

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática
y de Telecomunicación

Parametrización, modelado y simulación de baterías mediante la utilización de Battery Modeling en Simulink-Matlab



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Autor: Iñigo Garatea Alcázar

Tutores: Alfredo Ursúa Rubio

Alberto Berrueta Irigoyen

Pamplona, 7 de septiembre 2020

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría expresar mi agradecimiento a mis tutores de este trabajo los doctores Alfredo Ursúa Rubio y Alberto Berrueta Irigoyen por todo el interés, rigor y profesionalidad mostrados a lo largo de la duración del mismo. Su guía ha sido indispensable y de gran ayuda para lograr el éxito en este trabajo.

De la misma manera quiero agradecer a todos mis compañeros de grado, por tantas horas compartidas. Por las alegrías y tristezas que nos hemos llevado juntos, y por haber estado junto a ellos durante estos últimos cuatro años, que llegan a su fin con este trabajo. También agradecer a todos los profesores que tanto me han enseñado y de los que tanto he aprendido, en especial a todo el departamento de ingeniería eléctrica.

Asimismo, agradecer también a todos mis amigos que han estado a mi lado durante toda esta aventura y que tanto han aguantado mis idas y venidas con la ingeniería, ayudándome siempre que ha sido necesario.

Por último, pero no por ello menos importante, querría expresar mi gratitud a toda mi familia: padre, madre, hermanos y hermana. Sin lugar a duda han sido un gran apoyo y sin ellos no habría sido posible alcanzar esta meta.

Finalmente, querría expresar una gratitud especial a mis padres, por ser la fuente de inspiración en mi vida y por haber hecho posible todo lo que he logrado, por no dejar que nunca tirara la toalla y apoyarme en todos los aspectos de mi vida. Sin ellos no habría sido posible haber logrado este objetivo.

Resumen

Este Trabajo Final de Grado explora el potencial de la herramienta Battery Modeling desarrollada por MathWorks para su utilización en Simulink-Matlab. Este software está enfocado al modelado de baterías, más en concreto las de ion-litio. Abarcando grandes áreas como la caracterización de la propia batería, la estimación del estado de carga (SOC) y el estado de salud (SOH) o la simulación en tiempo real de la batería para el diseño de sistemas de gestión (BMS) de las mismas.

Más concretamente, este TFG pondrá un primer foco de atención en la estimación de los parámetros que permitan definir el comportamiento físico de una batería, partiendo de una serie de ensayos experimentales. Para más tarde observar cómo la simulación del modelo obtenido se adecúa a lo que se debería obtener de manera experimental.

Por otro lado, también se estudiará el uso de la herramienta Battery App, la cual permite predecir el comportamiento de la celda de la batería ante unas condiciones de corriente de descarga y temperatura arbitrariamente elegidas, haciendo uso única y exclusivamente de la hoja de características entregada por el fabricante de la batería.

Por último, también se profundizará en el área de balanceo pasivo de Battery Modeling. Donde se estudiará como en un sistema formado por 3 celdas unidas en serie, iniciadas en diferentes estados de carga acaban balanceándose. En este apartado se podrá visualizar este comportamiento en dos casos, un primero donde la batería es sometida a una carga-descarga. Y un segundo caso donde se aplica la técnica de corriente constante-tensión constante (CCCV).

Los resultados de este trabajo han permitido ahondar en el potencial que ofrece esta gran aplicación a la vez que ha permitido dar un primer paso en el enfoque que concede Simulink-Matlab a la hora de trabajar en el modelado y simulación de baterías, lo que podría facilitar el diseño de aplicaciones y sistemas de gestión donde sean requeridas.

Palabras clave: baterías, Matlab, Simulink, modelado.

Abstract

This Final Degree Project will explore the potential of Battery Modeling, a tool developed by MathWorks used in Simulink-Matlab. This software is focused on modeling batteries, more specifically lithium-ion batteries. Putting the spotlight on areas such as the characterization of the battery itself, the estimation of the state of charge (SOC) or the real-time simulation of the battery for the design of battery management systems (BMS).

More specifically, this TFG will firstly focus on the estimation of the parameters that allow to define the physical behaviour of a battery, taking as starting point the data of some experimental tests. Likewise, we will observe how the simulation of the obtained model adapts to what should be obtained experimentally.

On the other hand, we will also study the use of Battery App tool, which allows to know the behaviour of the battery cell under a specific discharge current and temperature conditions arbitrarily chosen, using only data from the data sheet provided by the battery manufacturer.

Lastly, we will also delve into the passive balancing area of Battery Modeling. We will study how, in a system made up of 3 cells joined in series, initialized in different states of charge, end up balancing. In this section we can see this behaviour in two different cases. In the first one the battery is subjected to a charge-discharge. And in the second case the constant current-constant voltage (CCCV) technique is applied.

The results of this work has allow to deepen into the potential offered by this great application, at the same time that it has allow to take a first step in the approach that Simulink-Matlab grants when working on battery modeling and simulation. In conclusion, this TFG gives a small vision of the facilities that Simulink-Matlab offers when it comes to the design of applications and management systems of batteries.

Keywords: batteries, Matlab, Simulink, modeling.

Contenido

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Estado del arte	1
1.2 Fundamentos teóricos	3
1.2.1 La celda electroquímica. Componente fundamental de la batería	3
1.2.2 Conceptos clave	4
Capítulo 2: Objetivos	6
Capítulo 3: Battery Modeling	8
Capítulo 4: Battery Parameter Estimation	10
4.1 Modelo de la batería utilizado por Simulink-Matlab	10
4.2 Comportamiento del modelo de la batería	11
4.3 Esquema del modelo utilizado en Simulink	12
4.4 Metodología empleada para la estimación de parámetros	13
4.5 Resultados	21
4.6 Validación de resultados	23
Capítulo 5: Battery App	25
5.1 Modelo de la batería utilizado por Battery App	25
5.2 Funcionamiento del Battery App	26
5.2.1 Información previa necesaria	26
5.2.2 Introducción de los datos	28
5.2.3 Cálculo de parámetros	30
5.2.4 Exportación de datos	32
5.2.5 Modificaciones del código	32
Capítulo 6: Passive Balancing	35
6.1 Balanceo de la celda	35
6.2 Modelo de Simulink-Matlab	36
6.3 Lógica de carga y descarga y de CCCV	38
6.4 Simulación del sistema	39
6.4.1 Battery charging	40
6.4.2 Passive balancing	42
Capítulo 7: Conclusiones y líneas futuras	46
7.1 Conclusión	46
7.2 Líneas futuras	48
Capítulo 8: Referencias	49

Capítulo 1: Introducción

1.1 Estado del arte

Desde la Revolución Industrial, el consumo energético mundial ha crecido, año tras año, hasta alcanzar las 14.400 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe) que se consumieron en 2018 según Enerdata [1]. Dentro de la continua expansión del sector energético, en las últimas décadas es especialmente destacable la evolución del sector eléctrico, cuya representatividad en el panorama energético global ha tenido una importancia creciente, tal como se muestra en la figura 1.

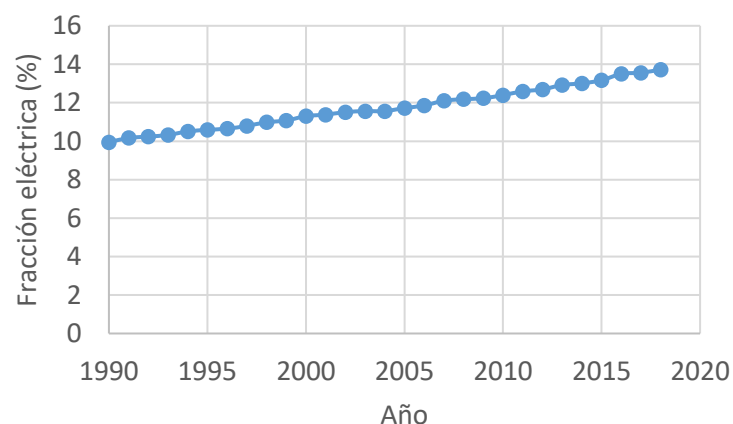


Figura 1. Porcentaje de consumo energético a nivel mundial en forma de electricidad. Elaboración propia con datos de Enerdata [1].

Esta importancia cada vez mayor de la energía eléctrica está motivada por cuatro ventajas fundamentales de este vector energético. En primer lugar, es una energía muy versátil, que se puede transformar de una manera muy sencilla y con una eficiencia elevada en otras formas de energía, como movimiento, calor, refrigeración o iluminación, entre otras. En segundo lugar, es una forma de energía libre de emisiones en el lugar de consumo, lo que la hace especialmente adecuada para su uso en centros urbanos, donde las emisiones contaminantes afectan directamente a la salud de la población. La tercera ventaja destacable de la energía eléctrica es la sencilla instalación requerida para transportar la energía desde las centrales de generación hasta los puntos de consumo. Un cuarto aspecto que juega a favor del sector eléctrico es la madurez tecnológica de la que gozan sus grupos generadores. Las máquinas eléctricas rotativas, tanto síncronas como asíncronas, que se utilizan tanto en grandes centrales eléctricas como en aerogeneradores son conocidas desde hace varias décadas, y los convertidores de potencia requeridos en centrales eólicas y fotovoltaicas han experimentado avances tecnológicos muy relevantes en los últimos 20 años. Por el contrario, el principal inconveniente de la energía eléctrica es el reto que supone su almacenamiento, es por ello que se trata uno de los principales puntos de estudio para el desarrollo de esta tecnología.

Durante las últimas dos décadas, las baterías de litio han experimentado importantes avances tecnológicos, permitiendo el desarrollo de aparatos electrónicos portátiles (móviles, tabletas, ordenadores portátiles, etc.) cada vez más potentes. Actualmente, los intereses de dos

sectores económicos de gran importancia están confluyendo en las baterías de litio como sistema de almacenamiento: el automovilístico y el eléctrico. Las principales empresas del sector automovilístico llevan varios años desarrollando los modelos de vehículos eléctricos que comercializarán durante la próxima década. El sistema de almacenamiento es el componente más crítico en este tipo de vehículos, dado que es necesario embarcar gran cantidad de energía reduciendo al máximo la masa necesaria para ello. Este desarrollo ha dado lugar a importantes mejoras tecnológicas, así como a una notable reducción en el precio de estas baterías.

Por otro lado, el reciente desarrollo de las baterías de litio ha dado lugar a diversas soluciones o productos, adecuadas para solventar las fluctuaciones de la red eléctrica, que abarcan dinámicas desde unos pocos segundos hasta varios días. Los principales servicios de red en los que las baterías de litio pueden desempeñar un papel relevante son los siguientes:

- **Emulación de inercia (virtual inertia):** los generadores síncronos que generan electricidad en las centrales tradicionales disponen de una gran masa que gira a la velocidad de sincronismo de la red. Esta masa giratoria aporta a la red eléctrica una inercia imprescindible para su correcto funcionamiento. Sin embargo, los generadores basados en electrónica de potencia, como los fotovoltaicos, no disponen de esta inercia de forma natural. Por ello, si se desea que se comporten de forma análoga a los generadores síncronos, se ha de incluir esta funcionalidad mediante el propio control del convertidor de potencia.
- **Regulación de potencia-frecuencia (power-frequency regulation):** para que la red se mantenga en equilibrio, la generación eléctrica debe coincidir con el consumo. Las pequeñas desviaciones entre generación y consumo se traducen en una aceleración (si la generación supera al consumo) o deceleración (en caso contrario) de la frecuencia de la red. Para que la red funcione adecuadamente, todos los generadores responden al unísono ante desviaciones de la frecuencia de la red, con el fin de devolverla a los 50 ó 60 Hz nominales y restaurando de este modo el equilibrio entre generación y consumo.
- **Control de rampas (ramp control):** las variaciones de potencia que se producen en una parte de la red han de ser compensadas en otra parte para mantener el equilibrio. En este sentido, los códigos de red de algunos países establecen la velocidad máxima a la que una planta puede aumentar o reducir la potencia generada. Dada la gran velocidad de los frentes de nubes y de las rachas eólicas, puede ser necesario un sistema de almacenamiento para cumplir con este tipo de restricciones en plantas eólicas y fotovoltaicas.
- **Uniformización de potencia generada (capacity firming):** las plantas de generación eléctrica pueden vender la energía generada en diversos mercados. En algunas ocasiones, estos mercados permiten fluctuaciones de potencia a lo largo del intervalo de tiempo negociado, siempre y cuando la energía entregada durante ese intervalo coincida con la cantidad pactada. Sin embargo, en otras ocasiones se exige un perfil de potencia homogéneo o se establecen límites para estas fluctuaciones.

Sin embargo, existe un serio problema de gestión de residuos en relación con las baterías requeridas para su implantación. Las baterías de litio contienen materiales críticos y elementos estratégicos que se pueden recuperar al final de su vida útil mediante un proceso adecuado de reciclado. El potencial económico, el reciclado de las baterías de litio tiene gran importancia desde el punto de vista ambiental. La producción de una tonelada de litio requiere del procesado de 750 toneladas de salmuera, o bien 250 toneladas del mineral espodumena ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$,

con un contenido teórico de Li_2O del 8,03%), que tras su procesado dan como resultado la tonelada de litio. Esta misma tonelada de litio se puede extraer mediante el reciclado de 28 toneladas de baterías desechadas (lo que supone recuperar el Li contenido en los packs de unos 256 automóviles [2]), reduciendo de esta forma la explotación de recursos naturales y el impacto ambiental que ello conlleva

1.2 Fundamentos teóricos

1.2.1 La celda electroquímica. Componente fundamental de la batería

Las baterías son dispositivos de almacenamiento de energía que permiten la transformación de energía química en energía eléctrica (y viceversa) mediante reacciones electroquímicas. Están formadas por la conexión en serie y/o paralelo de sus unidades básicas constitutivas, denominadas celdas electroquímicas. En estas celdas se llevan a cabo reacciones basadas en la combinación de procesos químicos de oxidación y reducción. Se denomina oxidación a un proceso mediante el cual un componente pierde (o libera) electrones, mientras que el proceso mediante el cual un componente gana (o captura) electrones se llama de reducción. Los procesos de reducción-oxidación (redox) son complementarios, es decir, siempre que un componente se oxida, otro se reduce, de forma que los electrones pasan del primero al segundo. En las baterías, los materiales que dan lugar a estas reacciones redox constituyen los electrodos. En concreto, al electrodo negativo se le denomina ánodo, ya que en él tiene lugar la reacción de oxidación durante la descarga de la batería. Análogamente, al electrodo positivo de las baterías se le denomina cátodo, y es en el que se produce la reacción de reducción durante la descarga.

Para cargar una batería es necesario modificar su estado de equilibrio natural, lo que supone un proceso no espontáneo que requiere de una fuente de potencia eléctrica. Esta fuente desplaza electrones desde el electrodo positivo (cátodo) hasta el negativo (ánodo) a través de un circuito eléctrico externo a la batería. El voltaje (o tensión) que se puede medir entre los terminales de una batería indica que esta se encuentra fuera de su punto de equilibrio electroquímico. La tensión de una batería depende de los materiales que formen ambos electrodos. Es por ello que una batería de una tecnología no tiene por qué ser intercambiable por otra de diferente tecnología. Por ejemplo, la tensión nominal de una pila alcalina es de 1,5 V, mientras que la de una de litio es de 3,7 V. Por lo tanto, si se sustituyen directamente unas pilas alcalinas por otras de litio, estaremos aplicando al dispositivo una tensión superior al doble de su tensión de diseño, pudiendo provocar deficiencias en su funcionamiento o incluso daños irreversibles en algunos componentes.

Para que la reacción redox pueda continuar, permitiendo de esta forma el almacenamiento energético durante la carga de la batería, un ion cargado positivamente (catión) migra, a través del electrolito y el separador, desde el electrodo positivo hacia el negativo por cada elec-

*Los componentes fundamentales de una **celda electroquímica** son los electrodos, el electrolito y la membrana o separador.*

trón transportado a través del circuito externo. Los dos elementos mencionados anteriormente (electrodos y electrolito) son los componentes fundamentales de una batería. La reacción redox se lleva a cabo en la interfase entre los mismos. Un tercer componente indispensable para el funcionamiento de la batería y que

también entraña un reto tecnológico importante es la membrana o separador. Este elemento comúnmente consiste en un material polimérico poroso situado entre ambos electrodos. Ha de ser un buen aislante eléctrico para evitar el flujo de electrones entre el ánodo y el cátodo a través del interior de la batería, al tiempo que debe permitir el paso de los iones, necesario para la carga y descarga de la batería, lo que se consigue al estar impregnado por el electrolito. Además, debe tener una resistencia mecánica suficiente para evitar fracturas que puedan dar lugar a cortocircuitos internos en la batería. La Figura 2 muestra un esquema de los componentes principales de una celda de iones de litio. Tanto los electrones (e^-) como los iones (Li^+) se desplazan en esta figura desde el ánodo hasta el cátodo, de forma que se representa la descarga de la batería. Mientras que los electrones se mueven a través del circuito eléctrico exterior, los iones migran disueltos en el electrolito, y atravesando el separador poroso.

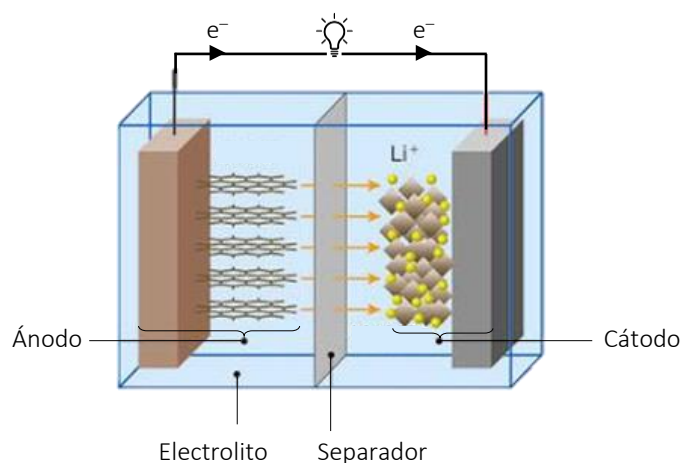


Figura 2. Componentes principales de una celda de iones de litio. Imagen adaptada de [7].

1.2.2 Conceptos clave

A continuación, se definen algunos parámetros importantes para establecer el estado o la operación de las baterías a los que se hará referencia a lo largo del informe.

Capacidad (C)

La definición estricta de capacidad de una batería se refiere a la cantidad de carga eléctrica (Ah) que puede almacenar. Dado que, desde el punto de vista de usuario de la batería, tiene más interés su capacidad energética (Wh), se suelen confundir estos conceptos y, a veces, se habla de capacidad de la batería al referirse a su capacidad energética.

La capacidad de una batería está determinada por la cantidad de material activo capaz de almacenar energía que contiene. A medida que la batería envejece, el material activo se va degradando y deja de ser útil para el almacenamiento energético, reduciéndose de esta forma la capacidad de la batería. En una instalación de baterías es, por tanto, importante monitorizar la capacidad a lo largo del tiempo, ya que es un parámetro de valor variable.

Ratio de carga / descarga (C-rate)

Es una magnitud utilizada habitualmente para referirse a la corriente (o potencia) de carga o descarga de la batería de una forma estandarizada. Se define como la corriente (o potencia) necesaria para descargar una batería totalmente cargada en una hora. La definición formal de este parámetro es:

$$C\text{-rate}_{\text{corriente}} = \frac{i}{C} \qquad C\text{-rate}_{\text{potencia}} = \frac{P}{C_{\text{ener}}} \qquad (1)$$

Siendo, por un lado, i la corriente de la batería (A) y P su potencia (W), y por el otro, C la capacidad nominal de la batería (Ah) y C_{ener} su capacidad energética nominal (Wh). Una notación habitual, especialmente en baterías de litio, es hablar, por ejemplo, de una potencia de 4C. Esto significa una potencia de cuatro veces el C-rate, es decir, en el caso de una batería de 1 MWh, una potencia de 4C equivale a un valor de 4 MW.

Tensión de corte

Con el fin de evitar daños permanentes y riesgos de seguridad, es necesario establecer unos límites máximos y mínimos para la tensión de operación de la batería. A estos límites de tensión que no deben ser sobrepasados en ningún momento se les conoce como tensión de corte.

Estado de carga (SOC)

Es una de las variables de estado más relevantes de una batería. Indica la carga almacenada en la batería en un momento determinado, y se expresa en tanto por ciento de la capacidad nominal.

Ciclo

Un ciclo de carga – descarga, o simplemente ciclo, es un proceso de carga y descarga (o descarga y carga) de la batería siendo el SOC el mismo al comienzo y al final del ciclo.

Degradación por ciclado

Se engloban en este parámetro todas las irreversibilidades que tienen lugar en la batería como consecuencia de las cargas y descargas que se llevan a cabo. Los efectos más notables son una reducción de la capacidad y un aumento de la resistencia interna.

Degradación por almacenamiento

Se asocia con las irreversibilidades que tienen lugar en la batería sobre las que no influye el perfil de cargas y descargas que se aplican a la batería. Estos procesos se ven influidos por la temperatura y el SOC de la batería. Los efectos más relevantes también consisten en una reducción de capacidad y un aumento de resistencia interna.

BMS (battery management system)

Es el conjunto de componentes electrónicos que incorpora internamente una batería. Sus principales funciones son garantizar unas condiciones de funcionamiento seguras, el cálculo de las variables de estado de la batería y la desconexión de la misma si se da una situación de funcionamiento anómala o peligrosa. [3]

Capítulo 2: Objetivos

El objetivo de este TFG es explorar el potencial de la herramienta Battery Modeling ofrecida por MathWorks. Esta herramienta, especialmente diseñada para facilitar las labores técnicas de los proyectos relacionados con baterías de litio, ofrece diversas funcionalidades relacionadas con el modelado de estas baterías, tanto eléctrico como térmico, el equilibrado de las celdas, la estimación de variables de estado como el estado de carga, o la predicción de la degradación del sistema a lo largo de su vida útil.

En este trabajo se tratará de analizar con detalle cada una de estas funcionalidades, valorando las facilidades que ofrece Matlab para cada una de ellas. Además, se validará el buen funcionamiento de la herramienta, cuantificando el nivel de precisión que se puede alcanzar mediante los ensayos experimentales que se requieran, que se llevarán a cabo en el Laboratorio de Almacenamiento y Microrredes de la UPNA.

Más concretamente, este TFG tiene como cometidos:

1. **Explorar las herramientas y la utilización de Simulink-Matlab para el desarrollo y diseño de baterías.**

Matlab es un software muy completado diseñado para facilitar labores técnicas dentro del ámbito de ingeniería. Se trata de un software de alto nivel computacional muy extendido en el sector que facilita las labores de cálculo y simulación en áreas como el cálculo de estructuras, control automático, resistencia de materiales y un largo etcétera. Con este objetivo, MathWorks ha desarrollado Battery Modeling, entrando de esta manera en el sector del almacenaje de energía. Se trata de una nueva herramienta que trabaja todos los aspectos fundamentales de la batería. Por tanto, este TFG explorará las facilidades que esta herramienta ofrece y donde puede desarrollar su máximo potencial.

2. **La parametrización de los componentes de una batería.**

Se trata de estimar cuales serían los valores que tomarían los diferentes elementos que conforman el modelo físico de la batería. Esta estimación se puede conseguir o a través de ensayos experimentales llevados a cabo en el laboratorio o mediante la Data Sheet facilitada por el fabricante.

3. **Análisis del balanceo pasivo y el CCCV.**

Un punto muy importante en una batería es el equilibrio en el estado de carga de sus celdas. La presencia de algún desequilibrio podría no solamente empeorar su rendimiento, sino también degradarla y en consecuencia acortar su ciclo de vida. Por ello uno de los objetivos en este TFG es estudiar las posibilidades que nos ofrece Battery Modeling en este ámbito tan importante. Para ello se tomará como ejemplo un paquete de 3 celdas en serie analizando su comportamiento.

4. Control de variables en paquetes de baterías.

En cualquier sistema en el que se requiera la utilización de sistemas de almacenaje de energía es imprescindible tener control no solamente de la capacidad y tensión de la batería, sino que también es fundamental vigilar otros aspectos como la temperatura, elemento crucial en cualquier aplicación, el comportamiento individual de cada celda o el estado de carga (SOC). En este trabajo, también se estudiarán las facilidades que Simulink Matlab ofrece para medir, controlar y estimar todas estas variables.

5. Medición del grado de aceptabilidad de los resultados obtenidos.

Una vez obtenido un modelo del comportamiento de la batería en Simulink-Matlab y de sus variables es necesario analizar si el comportamiento de la simulación realizada se ciñe correctamente al comportamiento que tendría la batería en la realidad. Un mal ajuste supondría que el modelo estimado es incorrecto o inválido. Por tanto, se trata de un punto central en este trabajo.

Capítulo 3: Battery Modeling

Battery Modeling es una herramienta desarrollada por MathWorks para el modelado de baterías en Simulink-Matlab. Los modelos de batería se han convertido en una herramienta indispensable para el diseño de sistemas alimentados por batería. Es por ello que ha sido desarrollada esta herramienta por MathWorks, cuyo objetivo es facilitar el diseño, control y desarrollo de sistemas de alimentación mediante baterías. En concreto Battery Modeling incluye la caracterización de baterías, estimación de estado de carga (SOC) y estado de salud (SOH). Para ello utiliza algoritmos de optimización. Además, también ofrece la posibilidad de simulación en tiempo real para el diseño de sistemas de gestión de baterías.

Más concretamente, Battery Modeling ofrece 6 grandes áreas de trabajo.

1- Cell Characterization

Esta primera área tiene como objetivo estimar los parámetros de una batería para crear un modelo de la batería a partir de datos experimentales.

2- Battery App

Cuyo objetivo es a partir de la data sheet y las condiciones de trabajo que el usuario imponga crear un modelo sencillo de la batería que sirva para saber cuál sería el punto de funcionamiento de esa celda bajo esas condiciones.

3- 3S-1P battery pack CCCV charge with passive balancing

Se trata de balancear el estado de carga de un paquete de baterías formado por 3 celdas en serie. Además, también se puede visualizar el comportamiento térmico de las celdas o su estado de carga (SOC).

4- EV battery cooling

El objetivo de esta área es el análisis del sistema de refrigeración de la batería. Permitiendo estudiar todas las variables que más influyen.

5- UKF observer to estimate SoC

Uno de los principales problemas a la hora de trabajar con baterías es el cálculo y estimación del estado en que se encuentran. Por ello en esta sección se emplea un Filtro de Kalman “unscented” (UKF), para estimar el SOC.

6- R0 online estimation using EKF

Por último, este bloque tratará de estimar la resistencia R_0 , pero utilizando un filtro de Kalman extendido (EKF).

Como se puede ver, Battery App, ofrece una gran multitud de posibilidades a la hora de trabajar, analizar y experimentar con Baterías. Así por tanto se puede decir que Battery Modeling quiere ser una forma excelente de predecir y optimizar los parámetros básicos de algunas baterías, como el estado de carga, la vida útil de la batería y las características de carga / descarga.

A lo largo de este Trabajo Final de Grado se irán explorando las 3 primeras áreas para entender y comprender correctamente cómo funciona la herramienta y ver si da buenos resultados. En la figura 3 se muestra un esquema general de todas las posibilidades que ofrece Battery Modeling y las relaciones existentes entre ellas.

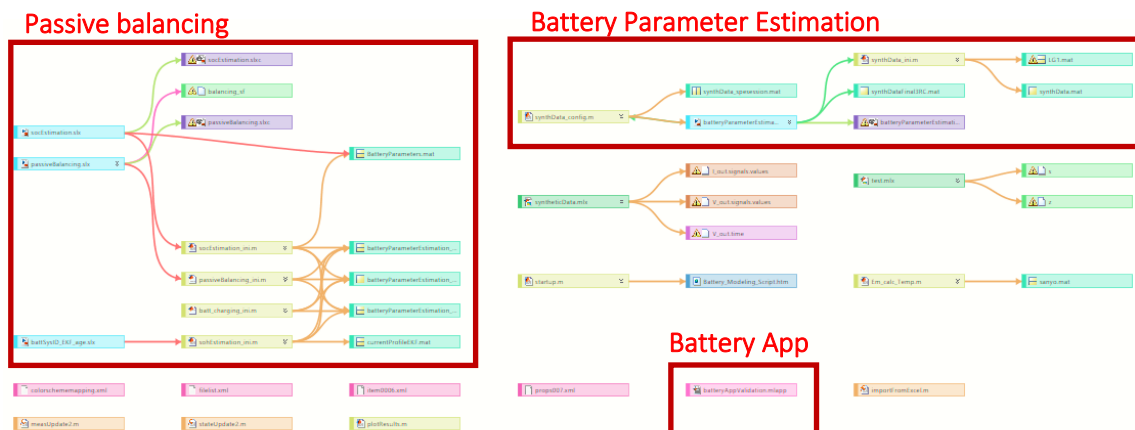


Figura 3 Esquema interno de la herramienta Battery Modeling

Por otro lado, en rojo se han remarcado las partes que serán estudiadas en este Trabajo Final de Grado. A lo largo de los sucesivos capítulos de este trabajo se tratará de ahondar en los puntos aquí descritos y analizar cuál es el alcance de esta nueva herramienta que se nos ofrece en estas áreas.

Capítulo 4: Battery Parameter Estimation

Las baterías de ion-litio son el tipo de celdas de batería de referencia en el sector eléctrico debido a su alta energía por unidad de masa y buen ciclo de vida. Sin embargo, con todas estas ventajas existe la necesidad de tener una gestión muy cuidadosa de la batería para garantizar un funcionamiento seguro y buena durabilidad. Por ejemplo, el voltaje y la temperatura deben mantenerse en unos límites aceptables para evitar una degradación prematura, al igual que una correcta carga y descarga de la batería.

En este capítulo se va a describir cómo **crear un modelo para una celda de batería** utilizando Simulink-Matlab.

En este capítulo se van a describir unas ideas de cómo crear un modelo para una celda de batería utilizando Simulink-Matlab, para que pueda ser utilizado más tarde, en el diseño y el control de sistemas de baterías.

Un buen modelo de la celda de la batería dirá cómo se comporta la misma en función de las condiciones del entorno y del estado de carga que está presente. Por ello, en este apartado se mostrará una manera de parametrizar el circuito equivalente basado en el uso de datos experimentales, usando una técnica basada en la optimización para ajustar los modelos a los datos experimentales [4].

También se explicará en este apartado cómo mejorar la estimación del modelo utilizando un circuito equivalente más complejo y elaborado.

4.1 Modelo de la batería utilizado por Simulink-Matlab

Desarrollar un sistema de baterías utilizando un modelo requiere un modelo de la celda de batería que represente de manera precisa su comportamiento real y sus dependencias con el entorno y con las condiciones de operación. Por ejemplo, se necesita reproducir la caída de voltaje y la recuperación dependiente del tiempo después de un evento de descarga como puede ser un pulso de corriente. Aunque sería muy deseable capturar todos los detalles del fenómeno electroquímico que sucede dentro de la celda, se requiere un método mucho más eficiente que pueda ser capaz de reflejar la realidad sin un coste de computación excesivamente alto.

El circuito equivalente que se muestra a continuación nos da un resultado que resuelve el compromiso entre fidelidad en el resultado y tiempo de computación. Este circuito equivalente es una analogía electroquímica que representa el comportamiento de una celda electroquímica utilizando un, relativamente, sencillo circuito eléctrico que contiene una fuente de tensión y varias resistencias y capacidades, que de manera conjunta reflejan el potencial de circuito abierto y la resistencia interna. Es el llamado, circuito capacitivo de la batería:

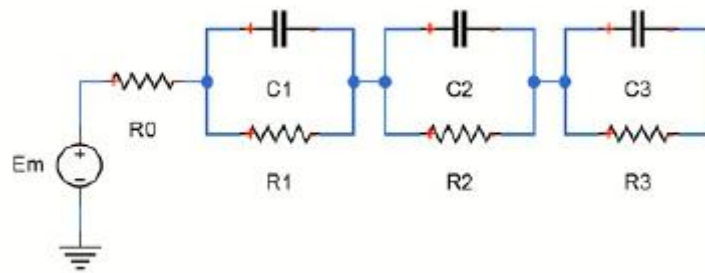


Figura 4 Modelo eléctrico de la batería utilizado en Battery Parameter Estimation

Como se puede observar este modelo incluye tiene 3 circuitos $R||C$ conectados en serie. No obstante, dependiendo de la precisión que se quieran tener en las estimaciones finales, se puede usar modelos con sólo 1 o 2 ramas RC. Cuantas más ramas RC tenga el modelo más preciso será este, sin embargo, el coste computacional para obtener sus parámetros también será mayor.

En este modelo vemos varios elementos E_m , R_0 , R_1 , C_1 , R_2 , C_2 , R_3 y C_3 , los cuales Simulink-Matlab tratará de estimar de la manera más precisa posible.

4.2 Comportamiento del modelo de la batería

También es interesante estudiar un poco cómo es la respuesta experimental de la batería que debe reflejar nuestro modelo.

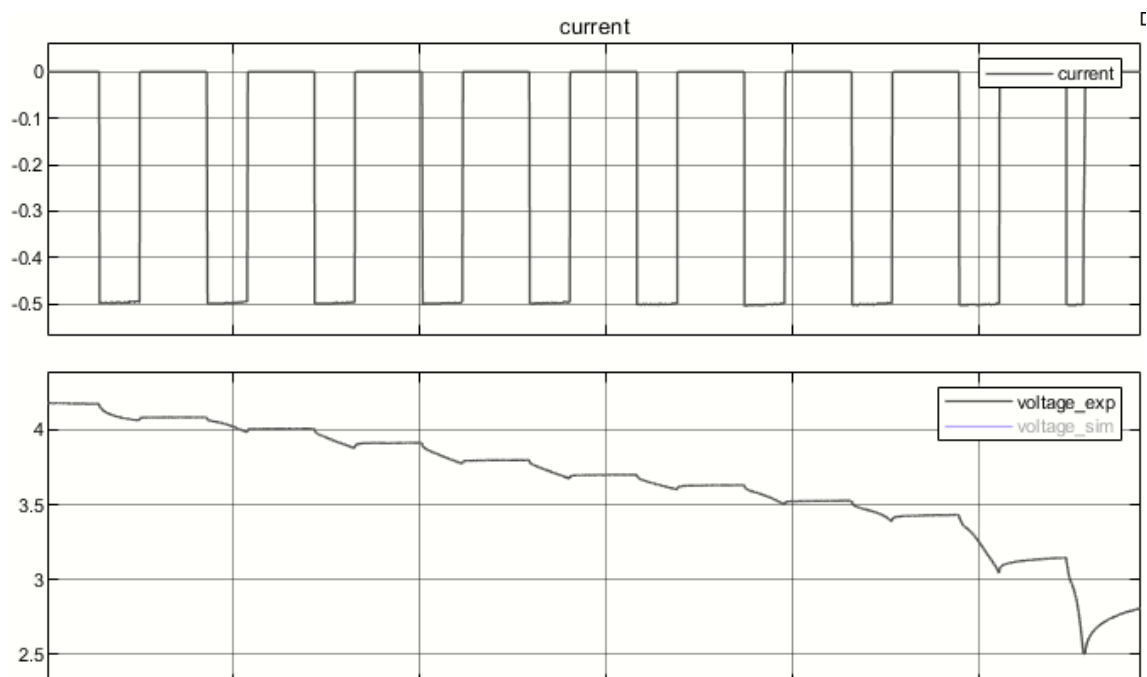


Figura 5 Resultado experimental de un ensayo de descarga en una celda de ion-litio

En esta figura se puede observar un ensayo de descarga llevado a cabo en el Laboratorio de Almacenamiento de la UPNA manteniendo la temperatura constante. En este ensayo la celda es descargada de un estado de carga completo hasta un estado de 0 SOC.

El objetivo es **reproducir este comportamiento** con el circuito equivalente estimando unos parámetros adecuados para cada elemento.

Por cada pulso de corriente de descarga se puede observar como la tensión de salida cae, y luego sufre una pequeña recuperación. Esta particular forma de descarga y carga en cada pulso es muy característico de las baterías de ion-litio. El objetivo es reproducir este comportamiento con el circuito equivalente estimando unos parámetros adecuados para cada elemento.

Por otro lado, como se puede observar, conforme la batería se va descargando, y el SOC varía, el comportamiento de la celda cambia. Es por ello, que para simular este comportamiento Simulink-Matlab utiliza tablas de consulta para cada parámetro (E_m , R_0 , R_1 , C_1 , R_2 , C_2 , R_3 y C_3).

	Temperatura 1	Temperatura 2	...
SOC 1			
SOC 2			
....			

En una tabla de consulta, se recogen varios datos del elemento que se quiere representar para distintos niveles de SOC y, si fuese necesario, también para varias temperaturas. De esta manera se conseguirá una tabla que reflejará de una manera bastante precisa su comportamiento. Y en lugar de utilizar ecuaciones para modelizar dicho comportamiento, se realizan distintas iteraciones entre los diferentes valores de la tabla de consulta.

4.3 Esquema del modelo utilizado en Simulink

En la figura 6 se muestra un archivo de Simulink (modelo) diseñado para conseguir todas las tablas de consulta de los parámetros mencionados.

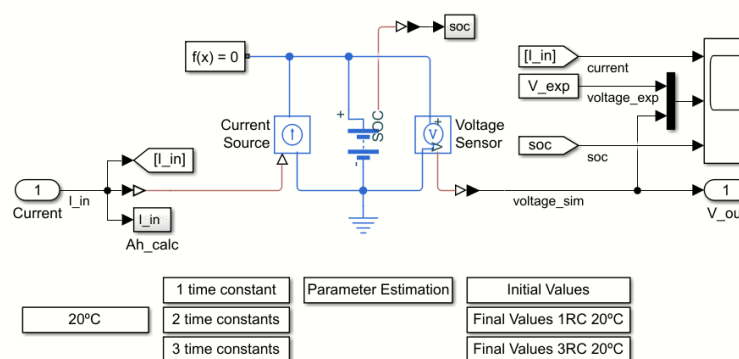


Figura 6 Esquema del circuito de Simulink utilizado para la estimación de los parámetros de la batería

En este modelo, una serie de pulsos de corriente, excitan a la batería, descargándola, de la misma manera en cómo fue hecho en el laboratorio. Al mismo tiempo, la salida de la batería es medida con un sensor de voltaje, para poder comparar de esta manera, el resultado de la simulación, con los datos obtenidos de manera experimental.

Haciendo doble click en la batería del modelo se observa lo siguiente:

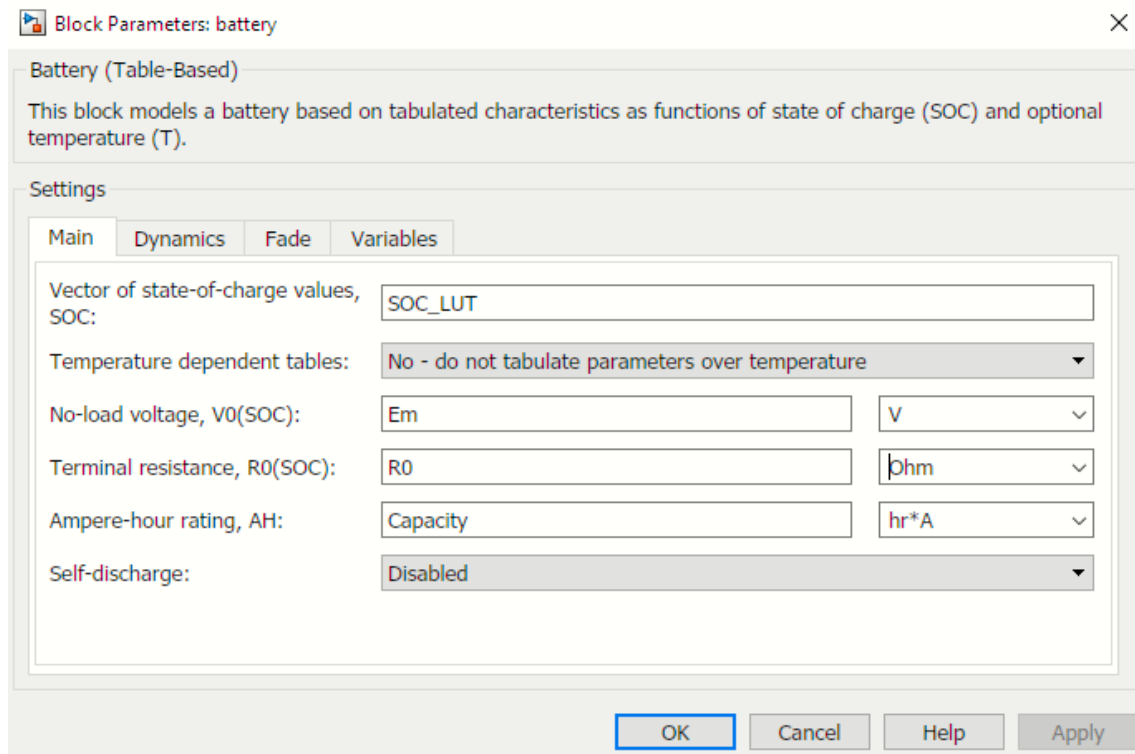


Figura 7 Cuadro de la batería de Simulink

Donde se ve, que a priori el circuito equivalente que se va a estimar está compuesto únicamente de una rama RC en paralelo, una resistencia en serie, y una fuente de tensión. No obstante, como se explicará más adelante, si fuese necesario, se podría ampliar el número de ramas RC, para tener un modelo, que, aunque sea más complejo, es más preciso.

4.4 Metodología empleada para la estimación de parámetros

Si ejecutamos el modelo utilizando las aproximaciones por defecto como parámetros (figura 8) veremos una discordancia bastante grande entre el resultado experimental y el simulado. Pudiendo hacer que, aunque ejecutamos el programa de estimación, el resultado obtenido no sea válido, ya que no conseguiremos el resultado deseado.

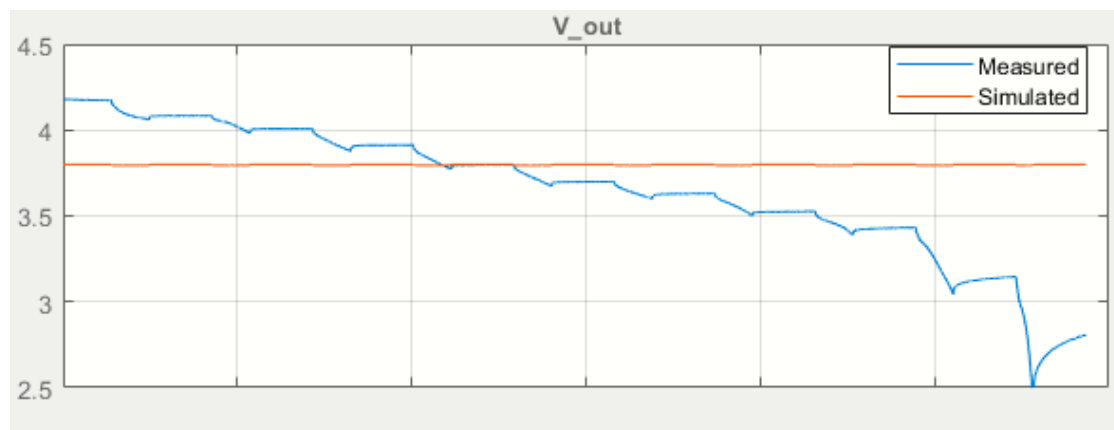


Figura 8 Simulación ejecutada manteniendo invariables los datos por defecto

Por ello, lo primero que hay que hacer es imponer una serie de condiciones iniciales en el Workspace de Matlab.

Name	Value
Capacity	31
Em	[3.8000;3.8000;3.8000;...
Em_max	[4.2000;4.2000;4.2000;...
Em_min	[3;3;3;3;3;3;3;3]
estimExp	1
expTemperature	[20,5,40]
numTau	1
prm_dyn	'2'
Qe_init	0
R0	[0.0100;0.0100;0.0100;...
R0_max	[0.1000;0.1000;0.1000;...
R0_min	[1.0000e-03;1.0000e-0...
R1	[5.0000e-04;5.0000e-0...
R1_max	[0.0100;0.0100;0.0100;...
R1_min	[1.0000e-05;1.0000e-0...
R2	[5.0000e-04;5.0000e-0...
R2_max	[0.0100;0.0100;0.0100;...

Name	Value
R2_max	[0.0100;0.0100;0.0100;...
R2_min	[1.0000e-05;1.0000e-0...
R3	[5.0000e-04;5.0000e-0...
R3_max	[0.0100;0.0100;0.0100;...
R3_min	[1.0000e-05;1.0000e-0...
SOC0	1
SOC_LUT	[0.1000;0.2000;0.3000;...
synthData	1x1 struct
tau1	[10;10;10;10;10;10;10;...
tau1_max	[100;100;100;100;100;...
tau1_min	[1;1;1;1;1;1;1;1]
tau2	[100;100;100;100;100;...
tau2_max	[500;500;500;500;500;...
tau2_min	[10;10;10;10;10;10;10;...
tau3	[500;500;500;500;500;...
tau3_max	[5000;5000;5000;5000;...
tau3_min	[100;100;100;100;100;...

Figura 9 Variables presentes en el Workspace de Matlab

Donde impondremos necesariamente el valor de la capacidad de la batería a modelar, los valores máximos y mínimos que queramos que tengan los parámetros de la batería, al igual que una estimación inicial de los mismos. También deberemos recoger los distintos estados de carga para los cuales queremos tener datos en nuestra tabla de consulta.

Una vez impuestas estas condiciones iniciales, se podrá ejecutar correctamente la estimación de parámetros. Para ello se utilizará una librería de Simulink llamada "Simulink Design optimitation". Esta herramienta actúa como un puente entre Simulink y las herramientas de optimización de Matlab. Para acceder a ella basta con hacer doble click en uno de estos tres botones dependiendo del modelo que queramos estimar para la batería (1, 2 o 3 ramas RC).

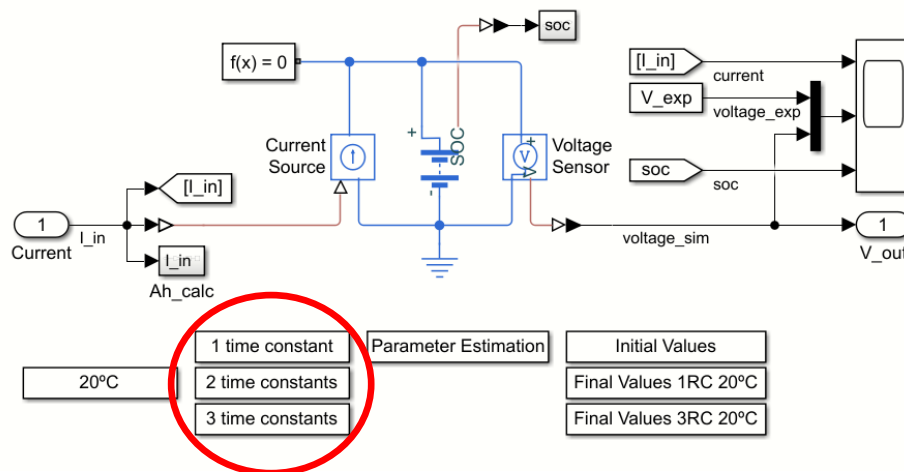


Figura 10 Selección de las opciones de 1,2 o 3 constantes de tiempo para el modelo de la batería

Una vez se haya hecho doble click, se nos abrirá la siguiente ventana:

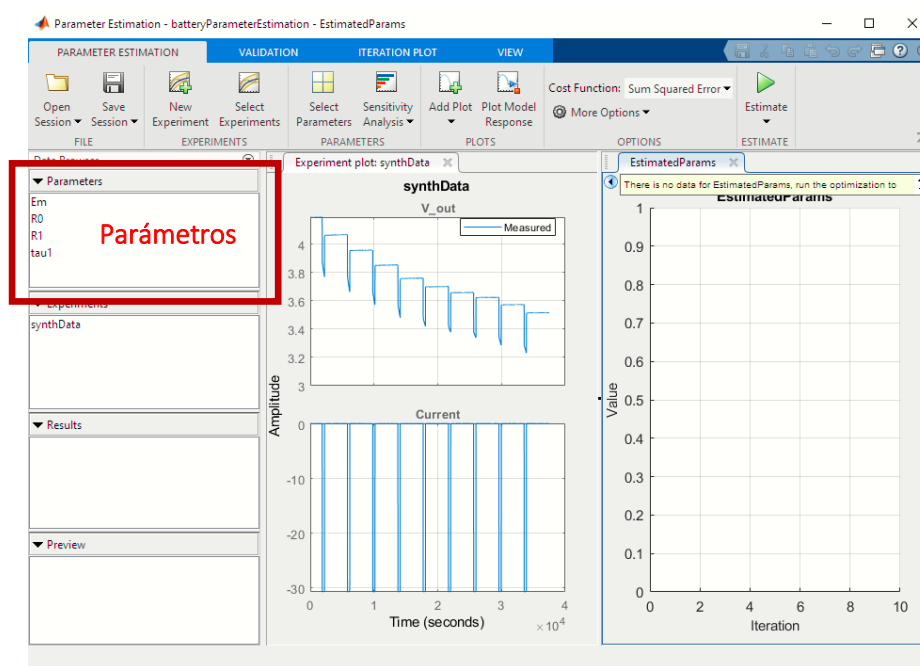


Figura 11 Interfaz de usuario y ubicación de los parámetros a estimar en Simulink Design Optimization

En la figura 11 se muestra la interfaz de usuario de la herramienta Simulink Design optimization. En ella se puede observar en la parte izquierda los 4 parámetros que se van a estimar. Hay que recordar que cada uno de estos parámetros es en realidad un vector de 10 elementos, cada uno correspondiente a un estado de carga diferente. Por otro lado, en la parte derecha tenemos dos gráficas que nos muestra los datos de tensión y corriente que vienen por defecto en el proyecto. Y luego otra gráfica donde se mostrará la evolución de los diferentes parámetros en las diferentes iteraciones.

El primer paso para realizar la estimación de nuestra propia batería es eliminar las dos gráficas. El objetivo es crear un experimento con nuestros datos experimentales. Una vez que se

han eliminado esas gráficas, se cargan los datos experimentales. Para ello se puede ir al Workspace de Matlab y sobrescribir los datos de tiempo, tensión y corriente en la variable SynthData.

Una vez se han cargado los datos en Matlab, se vuelve al Simulink Design Optimisation, y se hace doble click en el experimento synthData. Y aparecerá la siguiente ventana.

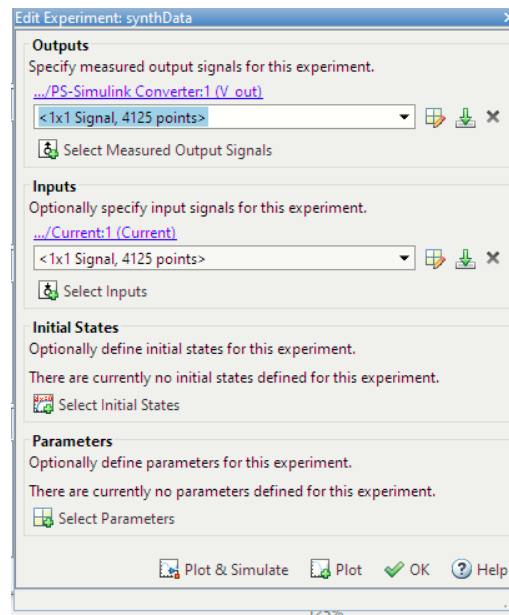


Figura 12 Ventana de introducción de datos del experimento

En esta ventana se han de indicar las variables de donde se quieren extraer los datos tanto de tensión (en el apartado Outputs) y de corriente (en el apartado Inputs) como de tiempo (en ambos campos). En este TFG se sobrescribieron los datos de la manera descrita anteriormente por lo que se introdujo los siguiente.

En el campo Outputs: [synthData.t, synthData.V]

En el campo Inputs: [synthData.t, synthData.I]

De esta manera, el programa ya sabe que datos ha de coger para su estimación y de donde ha de cogerlos. Una vez hemos rellenado esos campos, veremos que aparece los siguiente:

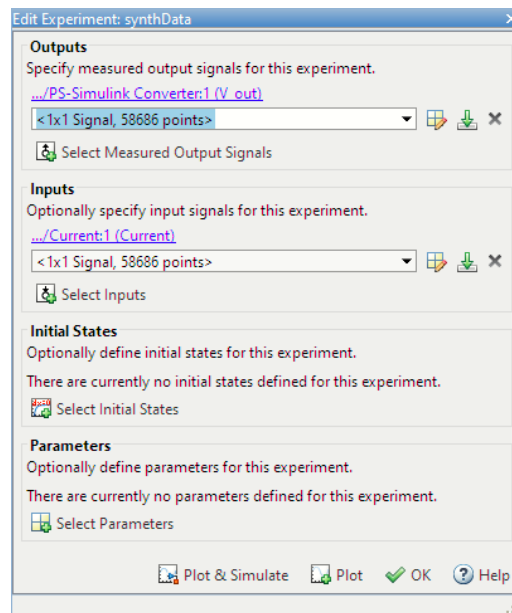


Figura 13 Modificaciones al introducir los datos

Donde el programa ha reemplazado de forma automática, nuestra ruta por el tipo de señal que Simulink interpreta que es, y el número de puntos que tiene cada vector de datos. Una vez que todos los datos se han introducido de manera correcta. Se le da a OK.

A continuación, se crearán las ventanas gráficas. Para ello, se hace click en “Add plot”. Aparecerá un desplegable y seleccionaremos synthData.

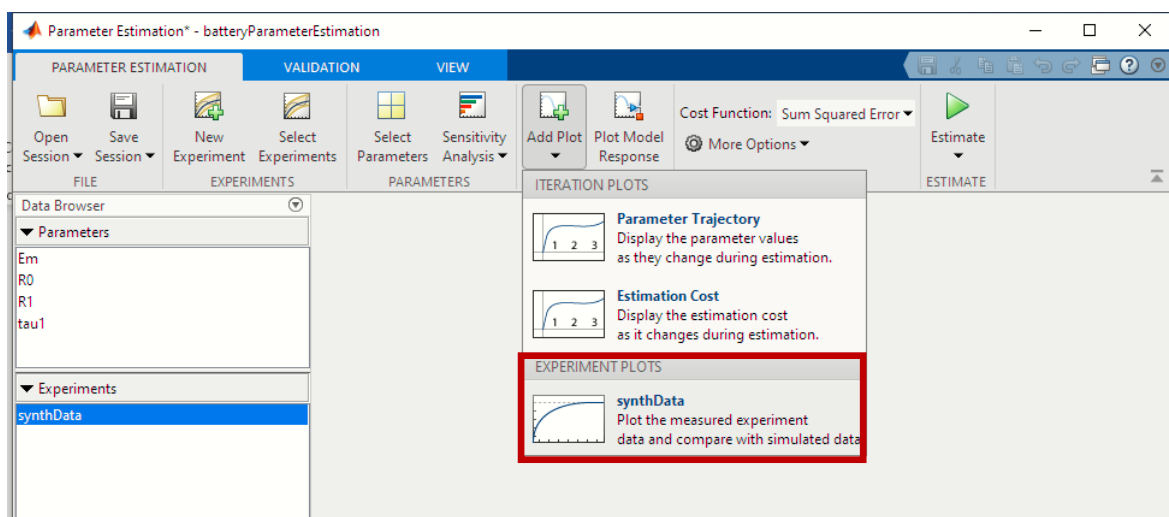


Figura 14 Desplegable donde seleccionar la gráfica del experimento

Acto seguido aparecerá la siguiente gráfica:

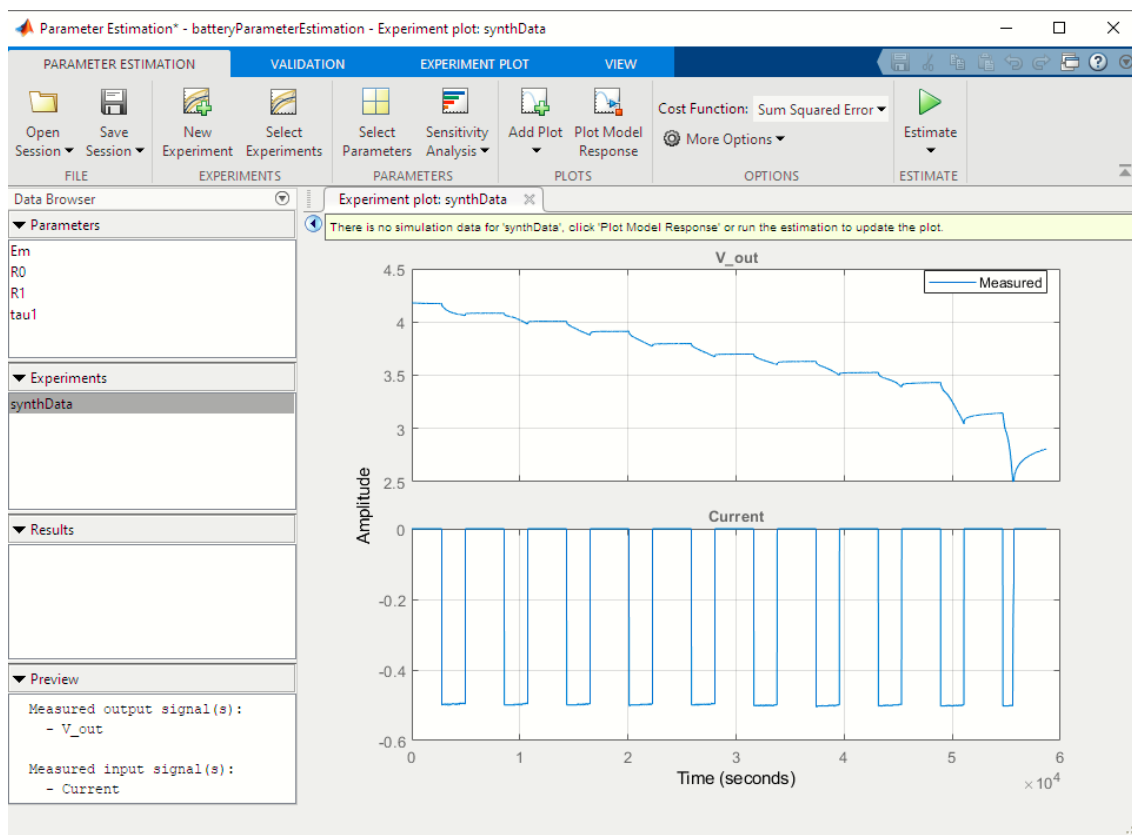


Figura 15 Gráfica de representación del experimento introducido

En la cual, de manera análoga a la gráfica anterior aparece representado la salida de tensión y el perfil de corriente, pero esta vez de los datos experimentales que se han cargado, y no los que vienen por defecto.

A continuación, se hace click en “Plot Model Response”

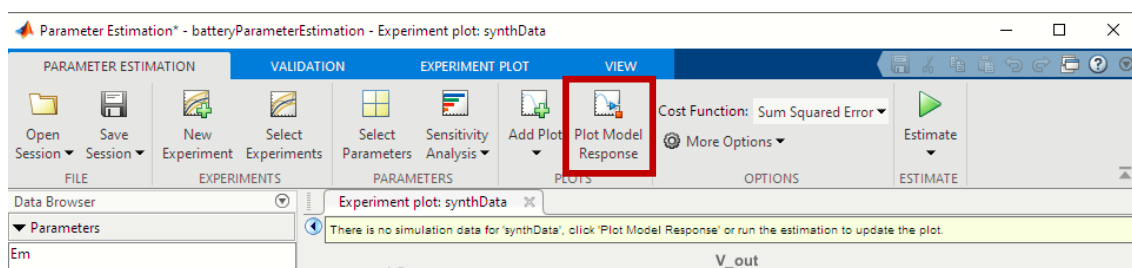


Figura 16 Ubicación del botón "Plot Model Response"

El programa ahora ejecutará una primera simulación (la cual aparecerá en color rojo), con los datos que habíamos impuesto como aproximación en el Workspace. Como se puede ver en la figura 17 esta simulación inicial no tiene por qué ser muy precisa, ya que aún no se han calculado los parámetros de los diferentes elementos del modelo.

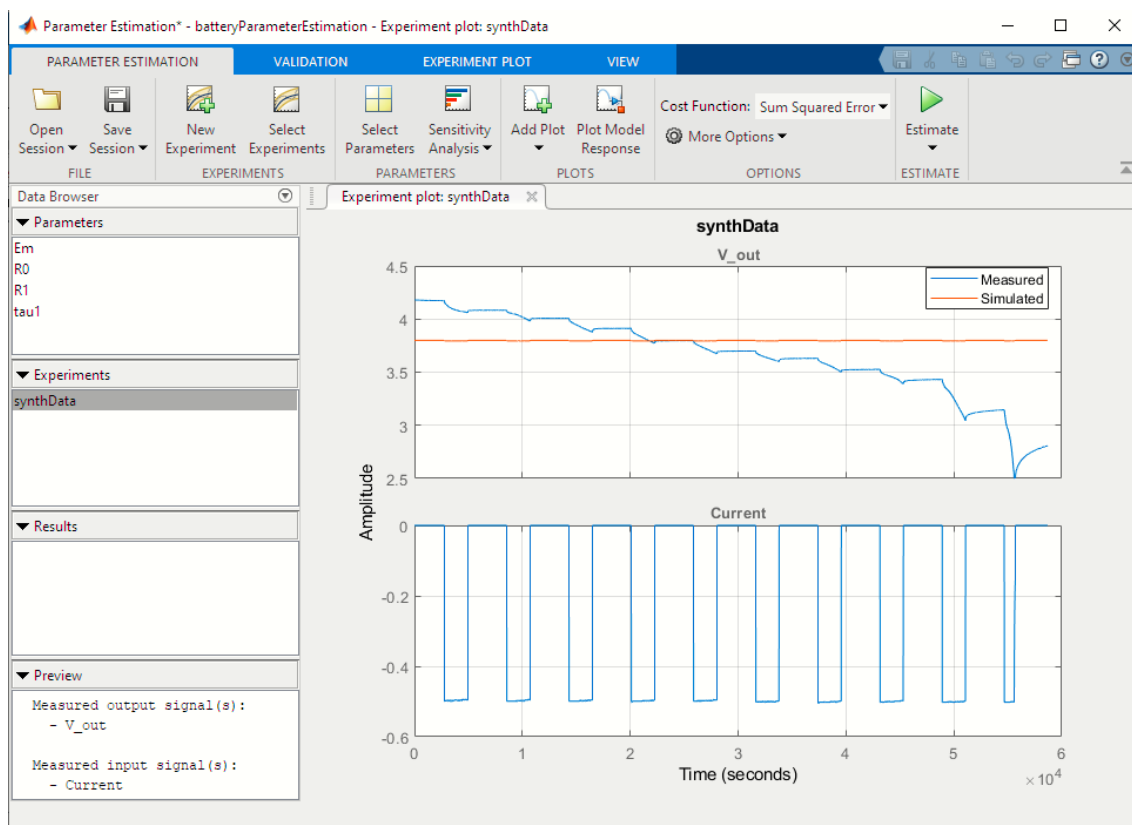


Figura 17 Simulación inicial al ejecutar la estimación de parámetros

Acto seguido, volvemos a hacer click en “Add Plot” → Parameter Trajectory.

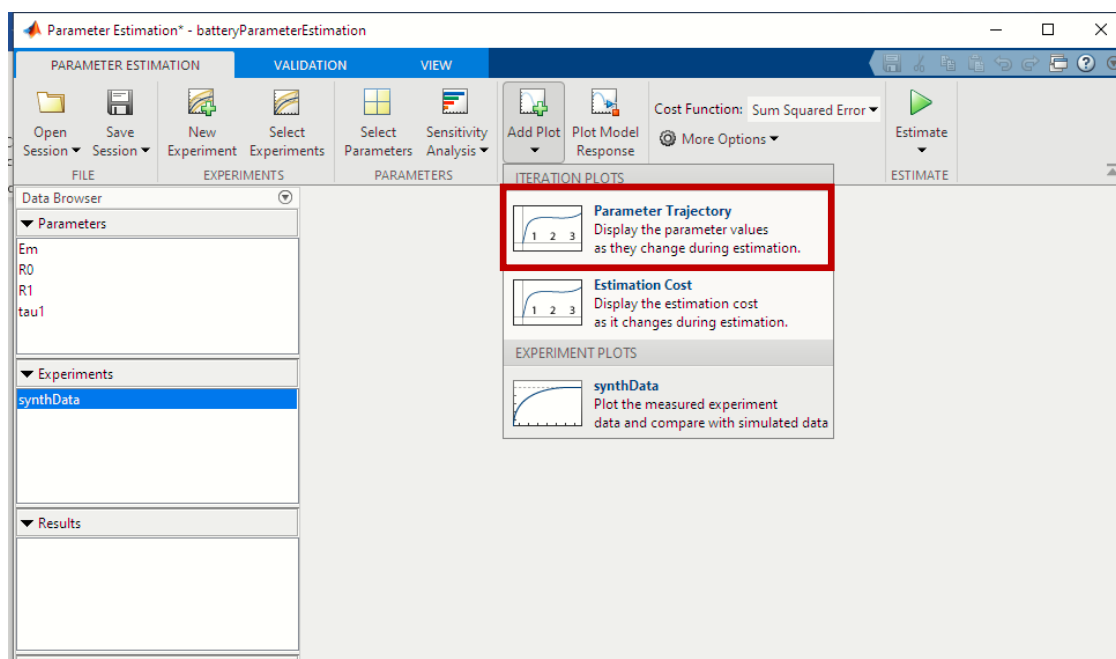


Figura 18 Desplegable donde seleccionar la trayectoria de parámetros

Y se nos cargará una gráfica donde posteriormente se nos mostrará la evolución de los diferentes parámetros.

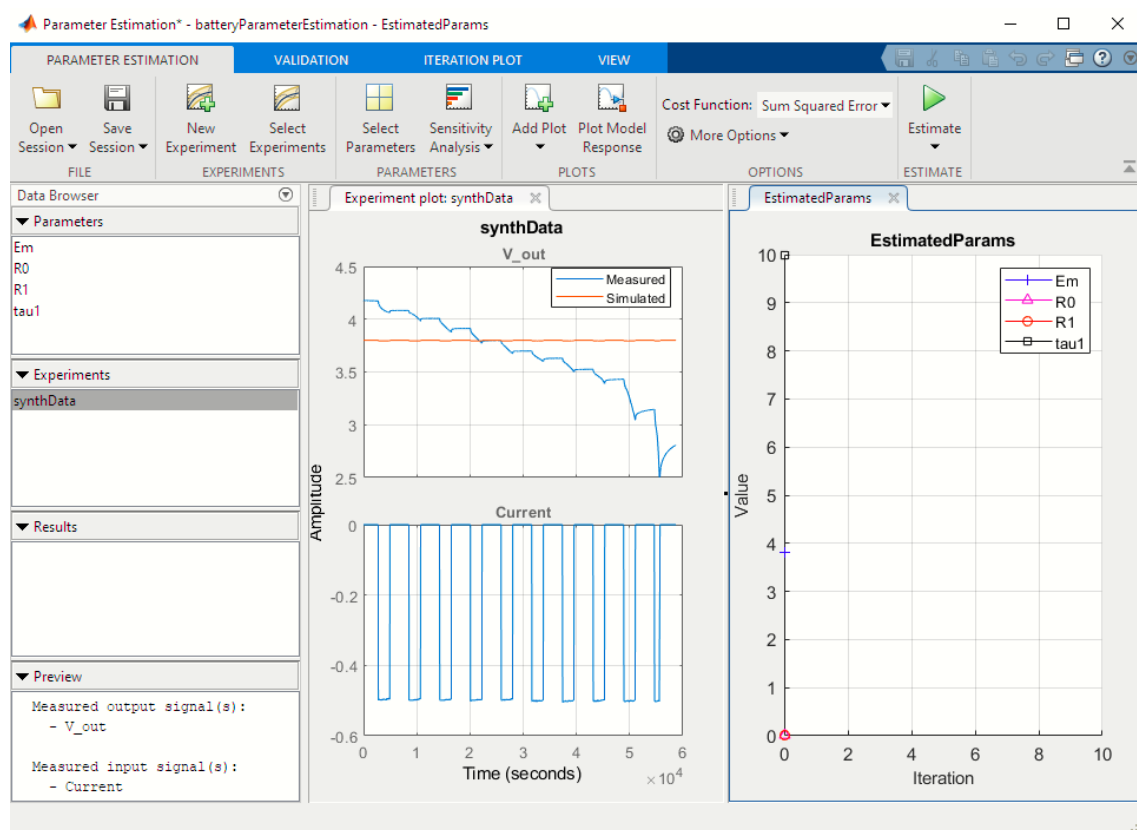


Figura 19 Espacio de gráficas en Simulink Design Optimization

Una vez hecho todo esto, ya estaría todo listo, y solo falta darle al botón “Estimate” para empezar la simulación.

4.5 Resultados

Una vez que se le da al botón de “Estimate” empezarán a ejecutarse unos algoritmos avanzados de optimización en las distintas iteraciones para calcular las diferentes tablas de búsqueda durante la estimación de los parámetros. Dependiendo, de la complejidad del modelo (si está compuesto por una rama RC, 2 o 3) se tardará más o menos en obtener los resultados.

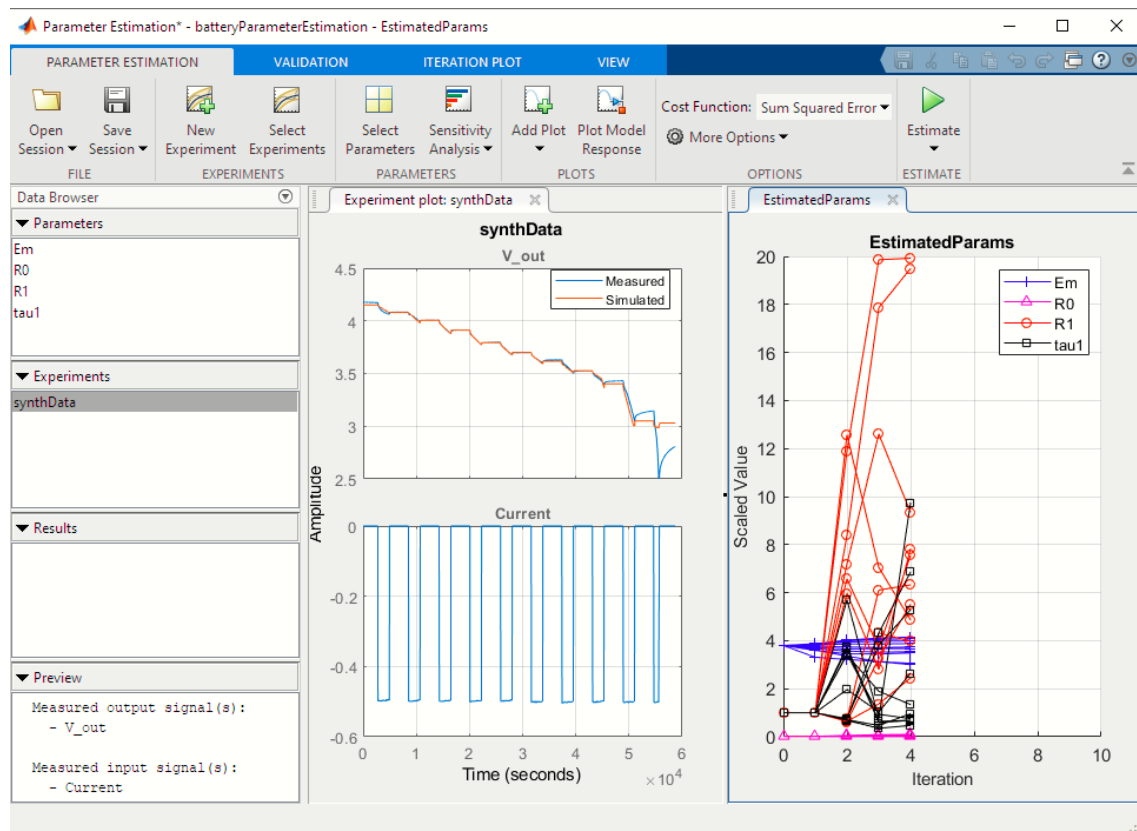


Figura 20 Ejecución de una estimación en Simulink

Mientras se ejecute la simulación, en el scope de Simulink se irá viendo cómo se van ejecutando una a una las diferentes estimaciones. Mientras tanto, en el Simulink Design Optimization en la gráfica de la izquierda se irá viendo cómo la simulación cada vez se ajusta más a los datos experimentales (véase figura 20).

Por otro lado, en la gráfica de la derecha se podrá ver como la evolución de los valores de los distintos parámetros (se puede elegir entre verlos de manera escalada o en valores reales). Cada color representa uno de los 4 elementos del circuito equivalente. Y cada línea de cada distinto color corresponde con un nivel determinado del SOC.

Por último, cuando la estimación de los parámetros termine, veremos que, en la pestaña de resultados, se nos guardarán los datos, y en el preview, podremos ver en una vista rápida los resultados de las diferentes tablas de consulta obtenidas.

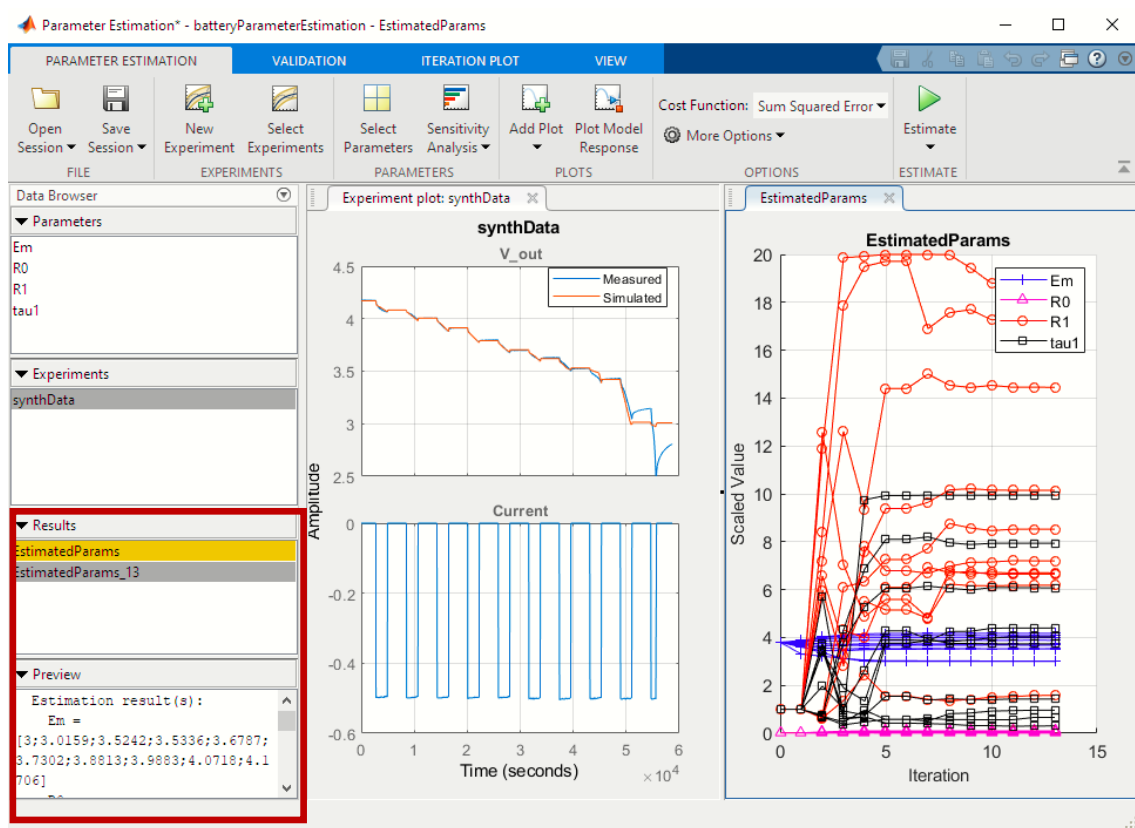


Figura 21 Ubicación de los resultados y la preview finales

Por ejemplo, tras ejecutar el programa, haciendo esta simulación, se obtuvieron los siguientes resultados:

Estimation result(s):

Em = [2.2311; 3.2181; 3.4777; 3.5472; 3.6745; 3.7315; 3.8811; 3.9887; 4.0723; 4.1744]

R0 = [0.099262; 0.098675; 0.087007; 0.0060807; 0.081558; 0.010749; 0.075824; 0.05342; 0.024839; 0.099816]

R1 = [0.0021921; 0.00257; 0.0057824; 0.00019789; 0.0023734; 0.00081278; 0.0012089; 0.0016972; 0.0017037; 0.00020746]

tau1 = [7.0332; 59.596; 36.971; 19.544; 34.748; 21.861; 16.268; 45.364; 6.4057; 12.411]

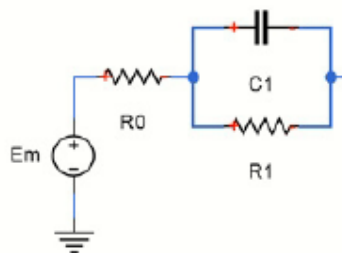


Figura 22 Modelo estimado en la simulación de estimación de parámetros en Simulink

4.6 Validación de resultados

Una vez obtenido la estimación de los parámetros de la batería en cuestión, ya estaría completo el modelo. Procedemos en este apartado, a ver, cómo de bien o mal, se refleja el comportamiento de una batería real, a partir de los valores estimados con el proyecto Battery Modeling.

Para ello, una vez ejecutada una simulación, se guardan esos datos de la batería. Se realizó un experimento en el laboratorio, y el mismo perfil de corriente se introdujo en Matlab para analizar los resultados.

El experimento consistía en varias cargas y descargas de la batería, realizadas con diferentes escalones de corriente, variando tanto su amplitud como duración en el tiempo. En la figura 23 se puede observar el resultado.

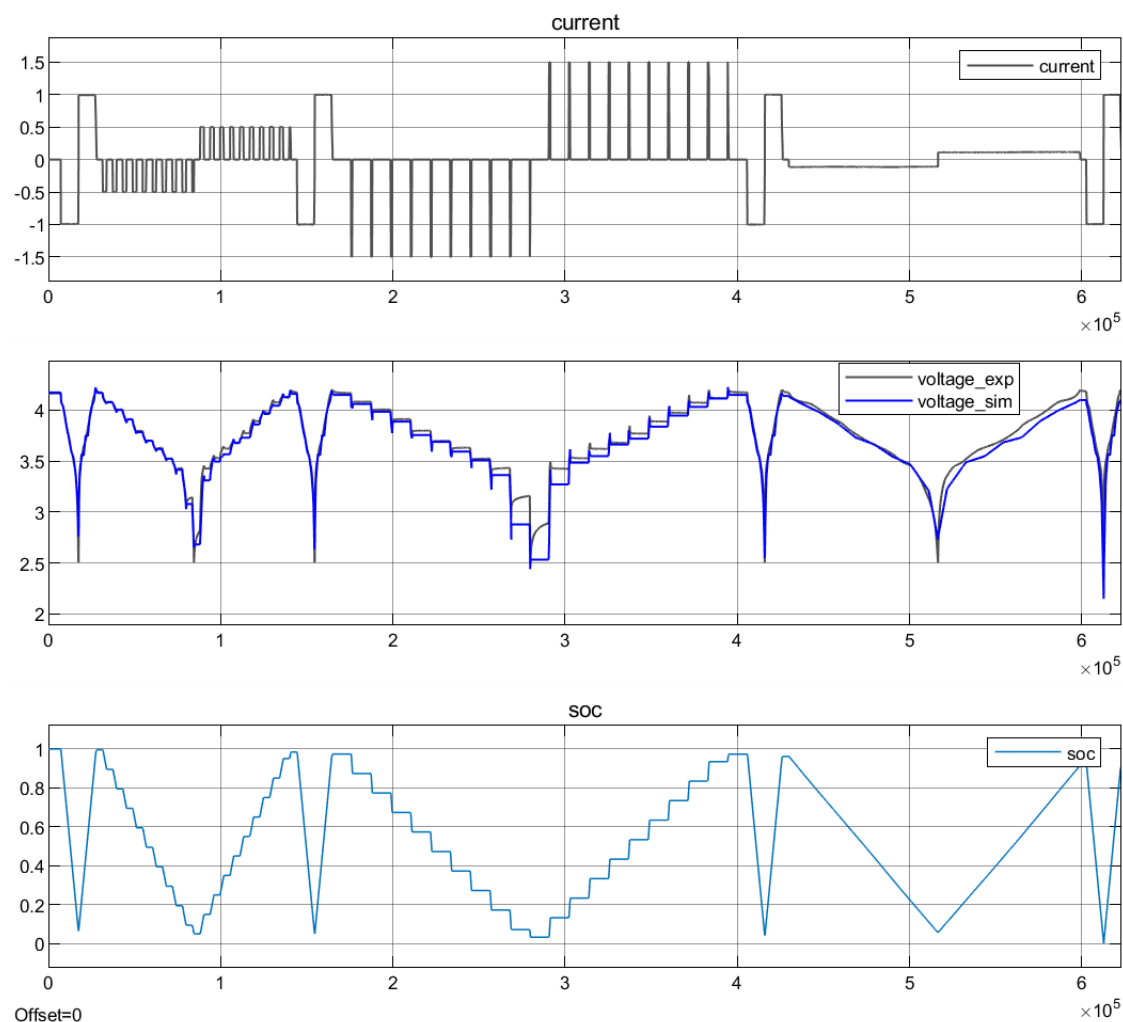


Figura 23 Resultado de la simulación ejecutada en Simulink

En esta gráfica se muestra, por un lado, el perfil de corriente utilizado en la validación, por otro el resultado experimental del voltaje obtenido, a la vez que el simulado, y por último una estimación del SOC realizado por Simulink.

Primero de todo, hay que mencionar, que el ajuste de parámetros se realizó teniendo en cuenta la primera descarga escalonada.

De esta manera, podemos observar que, ante un perfil arbitrario en la corriente, en rasgos generales, la simulación se aproxima bastante a los datos experimentales. Por un lado, se puede observar que en la primera bajada los datos experimentales y los simulados casan a la perfección. Algo lógico teniendo en cuenta, que fue con estos datos con los que se realizó el ajuste.

Así mismo, se puede apreciar, que la simulación no dista mucho de los datos experimentales, hasta que llegamos a la parte central del experimento. Donde podemos ver una pequeña discordancia. No obstante, esta discordancia puede ser tolerable ya que nos encontramos ante valores de SOC bastante bajos, por lo que en estas condiciones dentro de la batería están teniendo lugar diferentes procesos y reacciones químicas, que alteran el funcionamiento de la celda. Estos procesos químicos solo se dan con valores de SOC bajos, y hacen que el modelo físico de la batería no sea tan exacto.

Por otro lado, vemos que el comportamiento de la simulación también es mejor en las descargas que en las cargas de la batería, esto se puede observar claramente, en la última parte del ensayo. Donde se descarga y se carga la batería a una corriente constante. Y mientras que en la descarga se aproxima bastante bien, en la carga sí que se puede apreciar una pequeña diferencia.

La herramienta “Battery Parameter Estimation” funciona de manera **correcta** a la hora de simular el comportamiento de la batería

No obstante, a pesar de todo esto, se puede decir que la herramienta “Battery Parameter Estimation” funciona de manera correcta a la hora de simular el comportamiento de la batería, ya que refleja de manera fiel, el comportamiento que cabe esperar en el mundo real de la misma.

Por otro lado, hay que tener en cuenta también que esta estimación se ha realizado solamente utilizando una sola rama RC, por lo que si utilizásemos un circuito equivalente con más parámetros se obtendría un mejor resultado, ya que la parte dinámica de la simulación se adaptaría mucho mejor a los datos experimentales.

Para hacer una simulación con más ramas RC, basta con elegir cuantas constantes de tiempo queremos que tenga nuestro modelo, haciendo click en los botones que se encuentran en Simulink.

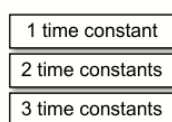


Figura 24 Botones de selección de constantes de tiempo

Capítulo 5: Battery App

El objetivo del Battery App programado en Simulink-Matlab es conseguir un modelo de la batería utilizando únicamente los datos provenientes de la datasheet. De esta manera se podría modelizar la batería sin necesidad de realizar ningún ensayo experimental.

El objetivo de Battery es conseguir un **modelo de la batería** utilizando únicamente los datos provenientes de la **Data Sheet**.

Esto puede ser una gran ventaja, ya que no siempre se dispone del equipo necesario o por algún motivo no se puede realizar pruebas de laboratorio a la celda que nos indiquen sus características. Sin embargo, siempre viene bien saber cómo sería el comportamiento de la misma ante ciertas condiciones de trabajo.

La utilización del Battery App podría indicar cual sería el comportamiento de las celdas de la batería ante unas ciertas condiciones requeridas por una aplicación. Todo ello, utilizando únicamente los datos de la hoja de características.

5.1 Modelo de la batería utilizado por Battery App

Al igual que en el capítulo anterior, el objetivo es obtener un modelo eléctrico que describa el comportamiento electroquímico de la celda. Para ello, es necesario la utilización de un circuito equivalente. No obstante, en este caso, al utilizar los datos de la hoja de características, no se hará uso del circuito capacitivo, ya que no disponemos de los ensayos necesarios para calcular esos parámetros. En su lugar se hará uso de un modelo diferente.

En concreto Battery App utiliza el siguiente modelo para simular el comportamiento de la batería.



Figura 25 Modelo eléctrico de la batería utilizado en Battery App

Como se puede observar es un modelo bastante sencillo compuesto por una fuente de tensión y 2 resistencias. La fuente de tensión representa la fuerza electromagnética de la batería. Una de las resistencias modela los fenómenos resistivos que tienen lugar dentro de la celda: debido principalmente a la conductividad de los materiales, las juntas entre ánodos, cátodos, etc. Y la otra resistencia modela los todos aquellos fenómenos que no son resistivos, pero que afectan al comportamiento de la celda. Principalmente son reacciones químicas que tienen lugar dentro

de la misma. Esta es la resistencia que modela la energía de activación necesaria para su funcionamiento.

Para entender bien que es la energía de activación hay que saber que cuando la batería absorbe o cede corriente se desvía de la condición de equilibrio, y los iones empiezan a circular por la batería. Para que un material pueda presentar conductividad iónica elevada se deben cumplir dos requisitos estructurales: por una parte, deben existir en su estructura posiciones vacías accesibles a las que los iones móviles puedan saltar; y por otra, es necesario que el valor de la barrera energética que posibilita el salto entre estas posiciones, es decir, el valor de la energía de activación (E_a) sea bajo [5].

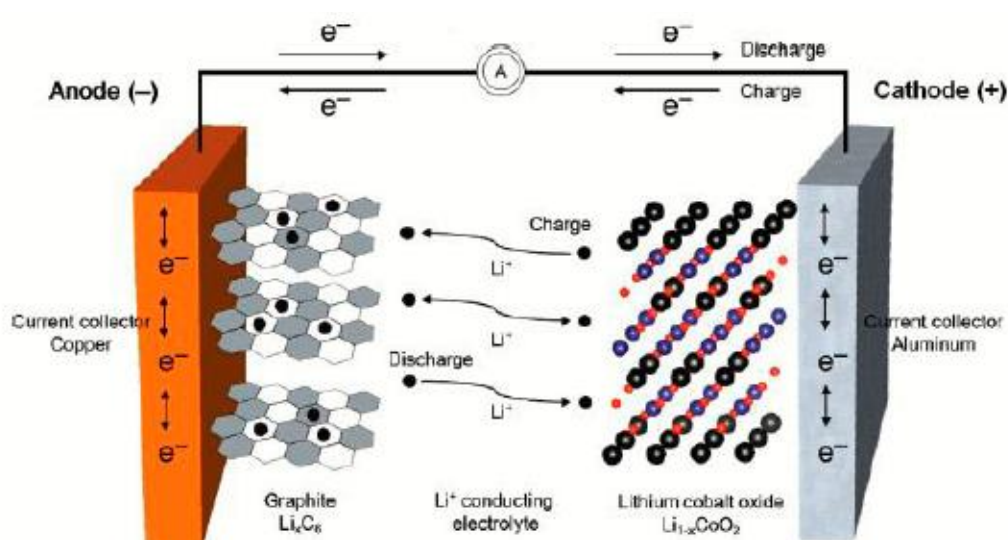


Figura 26 Esquema explicativo del movimiento de electrones dentro de una celda de batería [6]

Como se puede apreciar en la figura 26 si no existiesen esos huecos que permitiesen el movimiento de las cargas no podría existir corriente eléctrica dentro de la celda. De la misma manera, que si la energía necesaria para que esos iones se muevan fuese muy alta, la celda tendría grandes pérdidas, y no sería tan eficiente. Todo este proceso químico es el que trata de modelar la resistencia de energía de activación, que como vemos, no representa fenómenos óhmicos sino químicos.

5.2 Funcionamiento del Battery App

Como ya hemos mencionado antes, Battery App lo que hace es calcular los parámetros de la batería a partir de la hoja de características. Para ello es importante que dicha hoja de características presente algunos datos importantes como son la capacidad de la misma y algunas gráficas que muestren el comportamiento de esta, bajo ciertas condiciones.

5.2.1 Información previa necesaria

Para ejecutar esta aplicación es necesario que la hoja de características del fabricante presente los siguientes datos:

1. Capacidad de la batería.

2. Gráficas de descarga que muestren la variación de tensión frente la capacidad a diferentes corrientes de descarga manteniendo la temperatura constante.
3. Gráficas de descarga que muestren la variación de tensión frente la capacidad a diferentes temperaturas manteniendo la misma corriente de descarga.

Para la realización de este TFG, se utilizó una hoja de características de la batería Sanyo_UR18650W. La cual presentaba una capacidad de 1500 mAh y mostraba las siguientes gráficas:

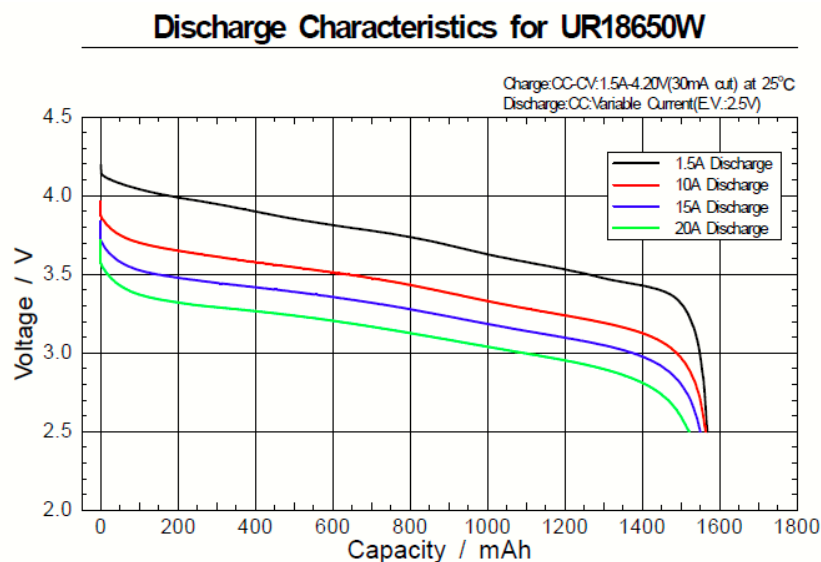


Figura 27 Gráfica de descarga a temperatura constante y diferentes corrientes

Como se puede observar en la figura 27 esta gráfica muestra las características de descarga de la batería en cuestión a una temperatura constante, pero variando la intensidad de corriente con la que esta es descargada, variando entre los 1.5 A hasta los 20 A de intensidad de corriente.

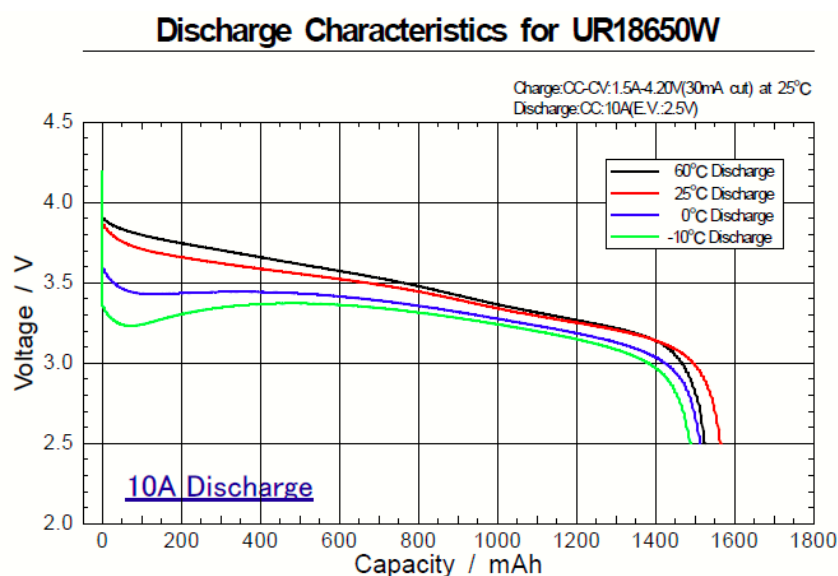


Figura 28 Gráfica de descarga a diferentes temperaturas, pero misma corriente de descarga

Por otro lado, en la figura 28 se muestra las características de descarga de la celda a una intensidad constante de 10 A, pero variando la temperatura desde -10 °C hasta 60 °C. Como se puede observar en ambas gráficas lo que se representa es la tensión entregada por la batería frente a la capacidad.

5.2.2 Introducción de los datos

Una vez que se tienen todos estos datos, es hora de introducirlos en Matlab. Para ello es necesario abrir el archivo *Em_calc_Temp.m*. y en las primeras líneas de código se indicará cual es la capacidad de la batería.

```
Editor - C:\Users\lgaratea98\Desktop\Simulaciones Alberto\BatteryModeling\batteryApp\Em_calc_Temp.m
Em_calc_Temp.m
1 %% Load data for Sanyo UR18650W battery
2 clear
3 load('sanyo.mat');
4
5 %%
6 SOC_LUT = (0:.1:1)';
7 Capacity = 1.5;
8 %% Resistance and OCV calculation
9 % Prepare normalized x axes for each current
```

Figura 29 Primeras líneas de código donde cambiar el valor de la capacidad de la batería

A continuación, se procede a trabajar con las gráficas anteriormente mostradas. Lo primero que hay que hacer es crear una variable de dos columnas por cada gráfica. Donde la primera represente el eje de abscisas y la segunda columna el eje de ordenadas. Se pueden coger cuantos puntos se quiera, aunque lo más recomendable es entre 40 y 60. Una vez que tenemos recogidos todos esos datos, se puede trabajar en la aplicación de Battery App.

Al abrir la aplicación, lo primero que el usuario se encuentra es lo siguiente:

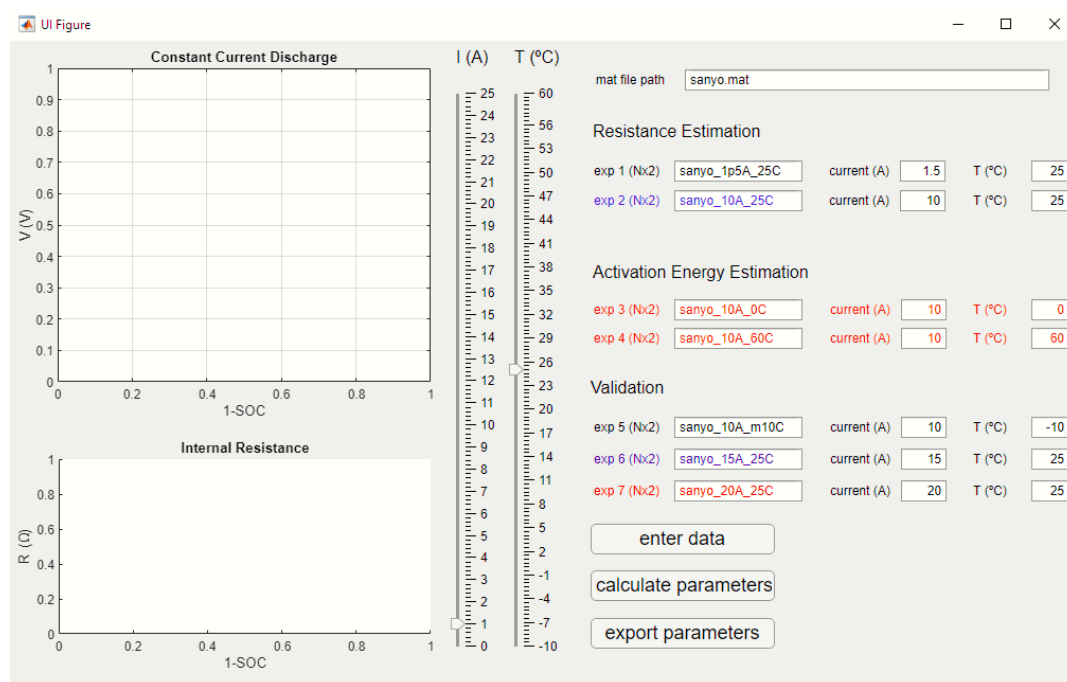


Figura 30 Interfaz de Battery App

Como se puede observar, se trata de una interfaz de usuario bastante sencilla, donde lo primero que hay que hacer es introducir en los diferentes campos, los vectores de las gráficas que se han preparado con anterioridad.

Hay que señalar, que la zona de introducción de datos está dividida en tres zonas. Por un lado "Resistance Estimation", por otro "Activation Energy Estimation" y por último la sección de "Validation". Esto es así, porque los datos que se introduzcan en cada uno de esos campos se emplearán para una dicha función en concreto. Es decir, los datos introducidos en la sección de Resistance Estimation se utilizarán para estimar la resistencia óhmica del modelo, los introducidos en Activation Energy Estimation para calcular el parámetro de la resistencia de energía de activación. Y por último el conjunto de datos de las gráficas introducido en Validation, servirán tanto para validar los otros parámetros calculados, como para calcular la fuente de tensión del modelo.

Una vez introducidos los datos de las gráficas y demás datos que se indican (como temperatura o corriente de descarga) se ha de hacer click en "Enter Data" y aparecerán las siguientes gráficas:

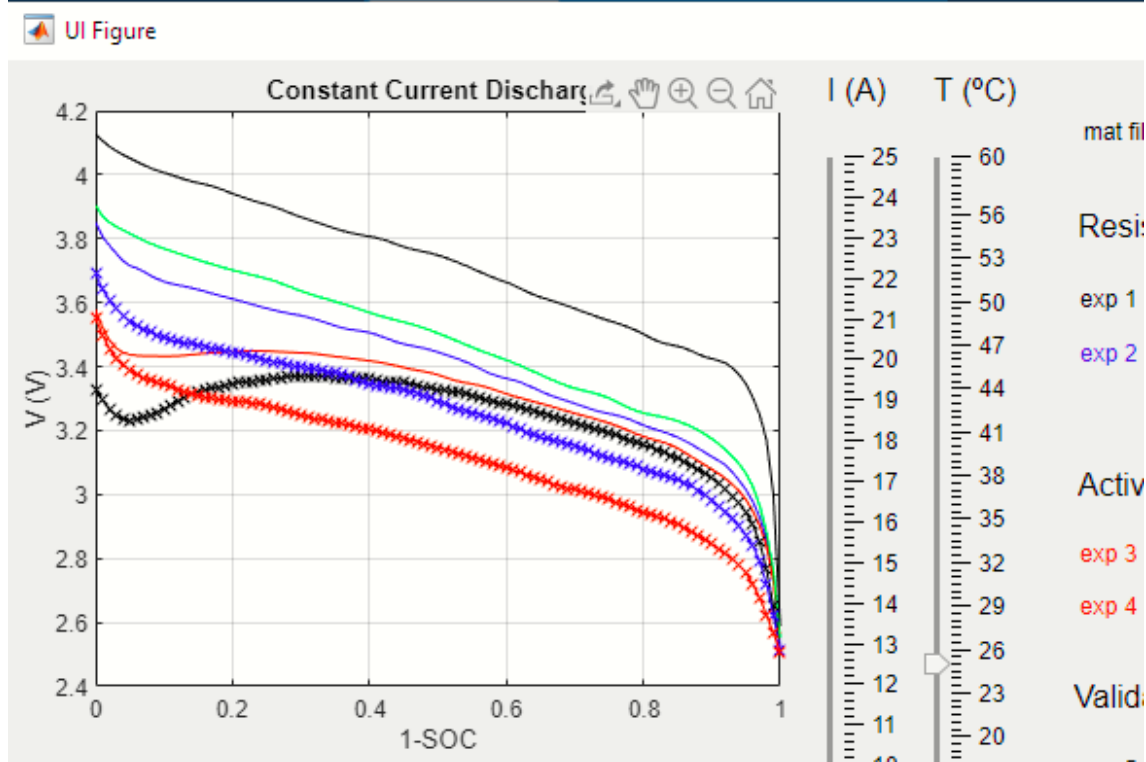


Figura 31 Gráficas introducidas en Battery App

Las cuales se trata de las mismas gráficas de la hoja de características. No obstante, al haber tenido que realizar anteriormente una partición de la gráfica en diferentes puntos, sirve para saber que los datos introducidos reflejan fielmente los representados en la hoja de características. Además, los colores de las gráficas deben coincidir con los colores de los campos donde hemos introducido los datos.

Una vez está todo en orden, se hace click en Calculate Parameters y el programa se empezará a ejecutar.

5.2.3 Cálculo de parámetros

Una vez se ha hecho click en “Calculate Parameters” en la gráfica inferior aparecerán las representaciones de las dos resistencias (que en la figura 32 en particular aparecen superpuestas), y en la superior la estimación de la fuente de tensión para las condiciones de corriente y temperatura impuestas. Y en la superior aparecerá una nueva gráfica que refleja la tensión de la fuente de tensión del modelo para estas condiciones dadas. Ambas gráficas vienen dadas en función del 1-SOC.

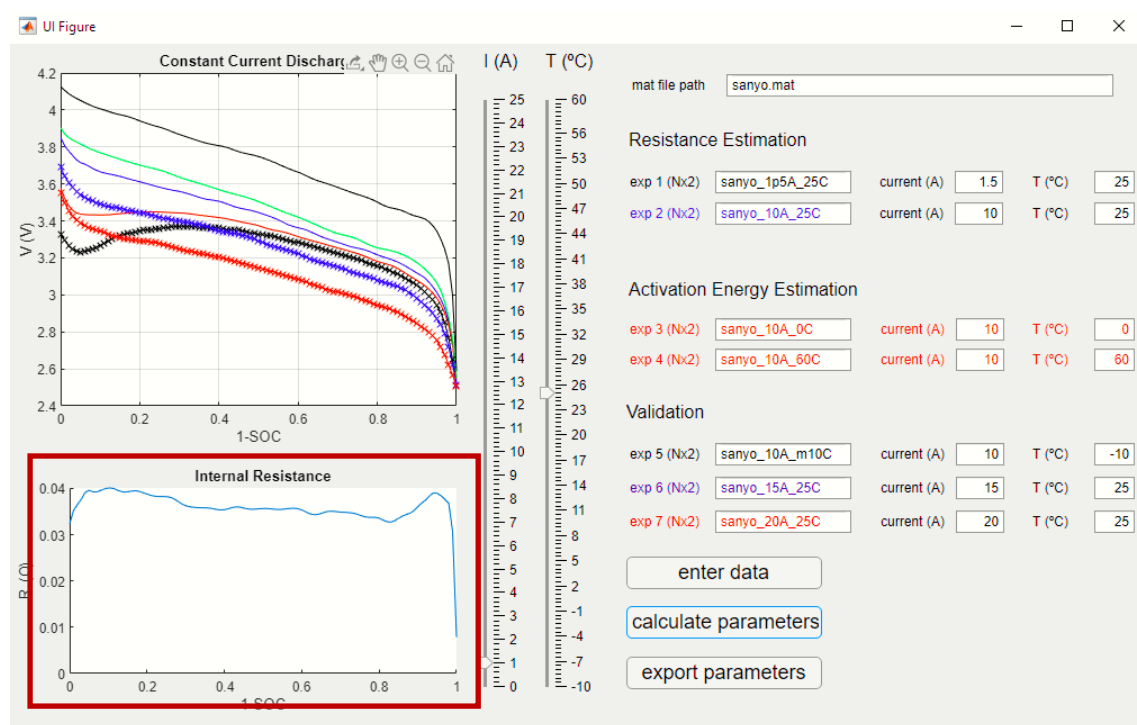


Figura 32 Gráficas de las resistencias del modelo de la batería utilizado en Battery App

Una vez se tiene todo esto, es cuando más partido se puede sacar a la aplicación de Battery Modeling. Y es que esta herramienta ofrece la posibilidad de calcular estos parámetros que se han calculado, si se cambian las condiciones de contorno tanto de temperatura como de intensidad de corriente. Para ello basta con mover los dos indicadores centrales y de manera automática, se realizarán otra vez todos los cálculos.

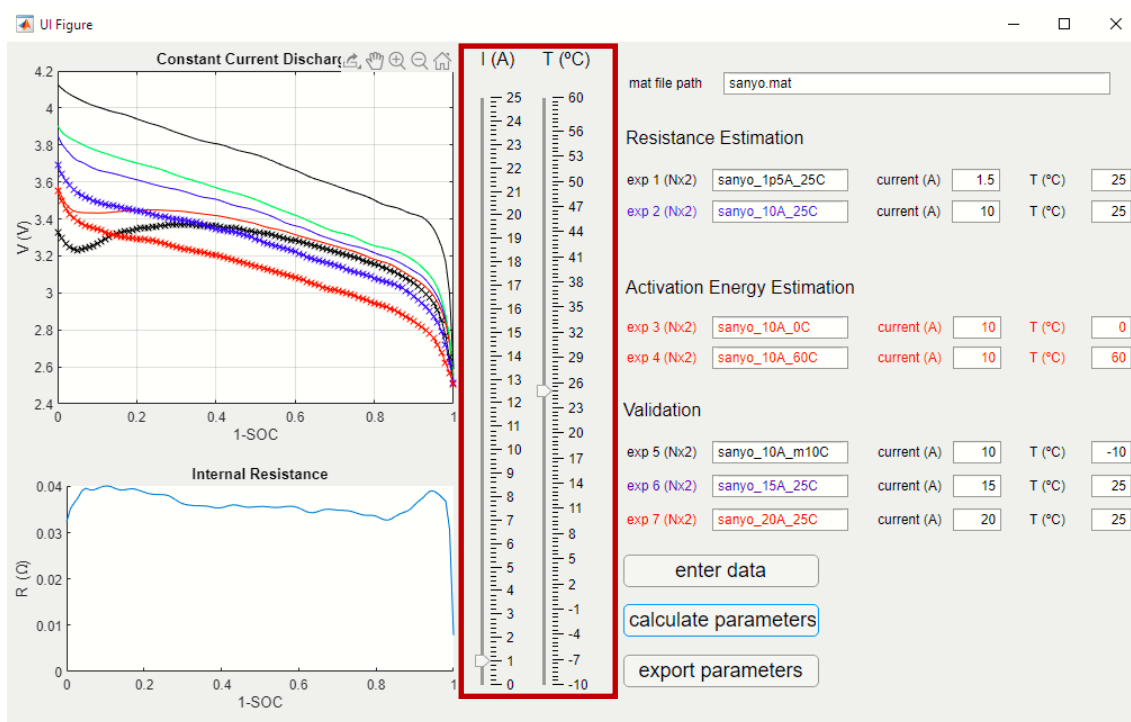


Figura 33 Ubicación de los indicadores de corriente y temperatura en Battery App

Por ejemplo, si se mueve el indicador de temperatura a -10 °C y el de corriente a 25 Amperios se podrán observar las variaciones.

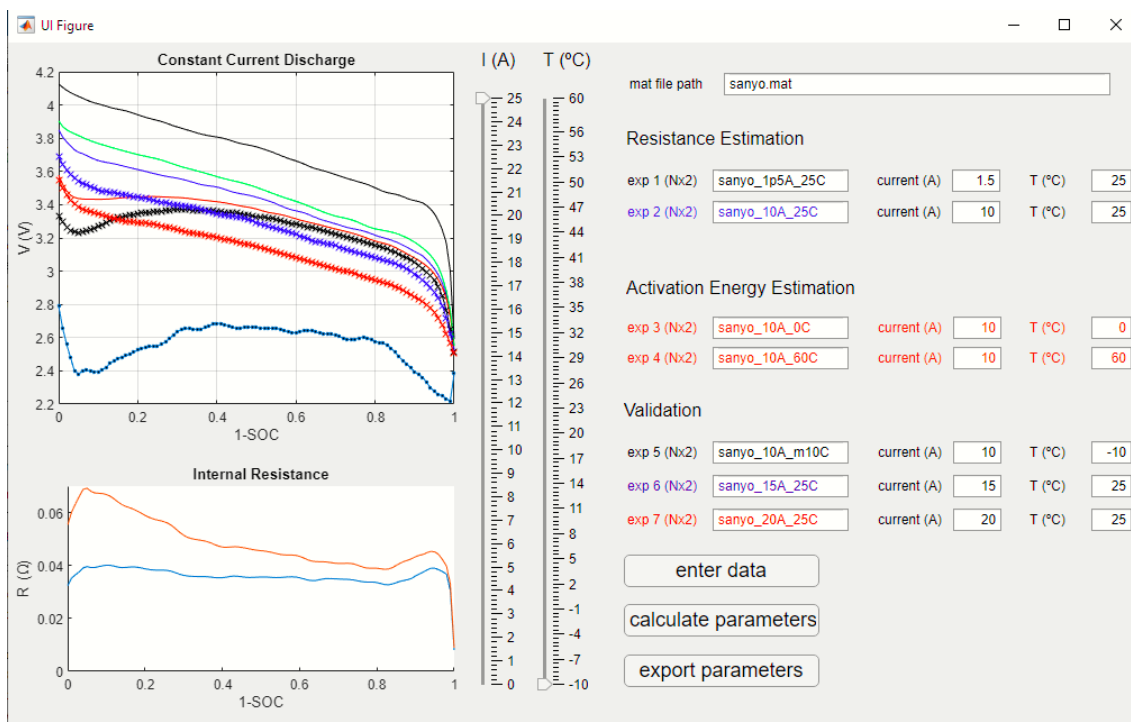


Figura 34 Variaciones sufridas al cambiar los datos de corriente y temperatura

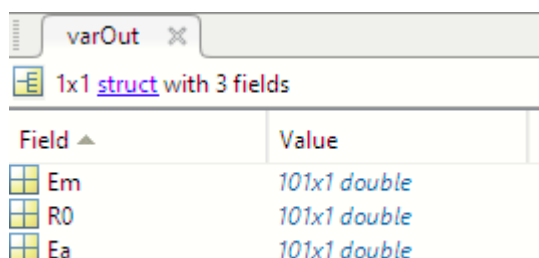
Ahora se puede observar claramente que la tensión de circuito abierto ha decaído considerablemente al trabajar en esas condiciones. De la misma manera que ahora las gráficas de resistencia interna y de energía de activación también han variado.

Este es el gran potencial de esta herramienta: permite calcular el punto de operación de la celda en unas condiciones donde a priori no conocemos su comportamiento. Esto es debido a que la herramienta Battery App está diseñada para hacer, a través de sus programas de optimización, interpolaciones entre los datos de entrada. Permitiendo obtener al usuario unos parámetros, que le permitirán crear un modelo preciso de la batería. Modelo que dependerá del punto de las condiciones de trabajo de la celda y que representará de manera muy particular la respuesta de la misma. Asimismo, si las condiciones cambiaran, se podría volver a utilizar este programa para volver a calcular el modelo de una manera bastante rápida, sencilla y eficaz.

5.2.4 Exportación de datos

Una vez calculados los parámetros de nuestro modelo en las condiciones precisas que se desean, sólo falta exportar los datos en un archivo .mat por si queremos utilizarlos en otros programas o para otras aplicaciones. Para ello basta con darle al botón de “Export Parameters” y de manera automática se guardarán, en el lugar que le hayamos indicado en el código.

Si no modificamos el código original, se guardará automáticamente en la carpeta de Battery App bajo el nombre *equivCircParam.mat*. y bastará con hacer doble click sobre él para que se carguen de manera automática en el Workspace de Matlab. Los parámetros que se exportarán son los siguientes:



Field	Value
Em	101x1 double
R0	101x1 double
Ea	101x1 double

Figura 35 Parámetros que se exportarán en Battery App

Como se puede observar se trata de los tres parámetros explicados en el modelo: Em, R0 y Ea. Cada uno consiste en un vector de 101 elementos. Cada elemento corresponde con un aumento de un 1% del SoC, de 0 a 100 %.

5.2.5 Modificaciones del código

Si por alguna razón se quisiera acceder al código que ejecuta Battery App ya sea para modificar el directorio de guardado, o porque se quisiera modificar algún elemento a la hora de estimar los elementos del modelo, se han de seguir los siguientes pasos.

Primero, en Matlab, se hace click en *batteryAppValidation.mlapp*.

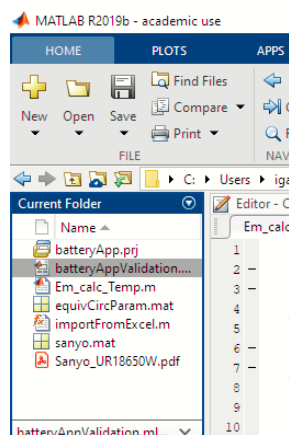


Figura 36 Ubicación en Matlab de batteryAppValidation.mlapp.

Una vez hecho doble click, se abrirá una ventana muy parecida a la interfaz de usuario de Battery App. Sin embargo, esta vez en la esquina superior derecha tenemos acceso a dos botones. El botón de Code View, dará acceso a todo el código ejecutado por esta herramienta, pudiendo modificar lo que se considere necesario.

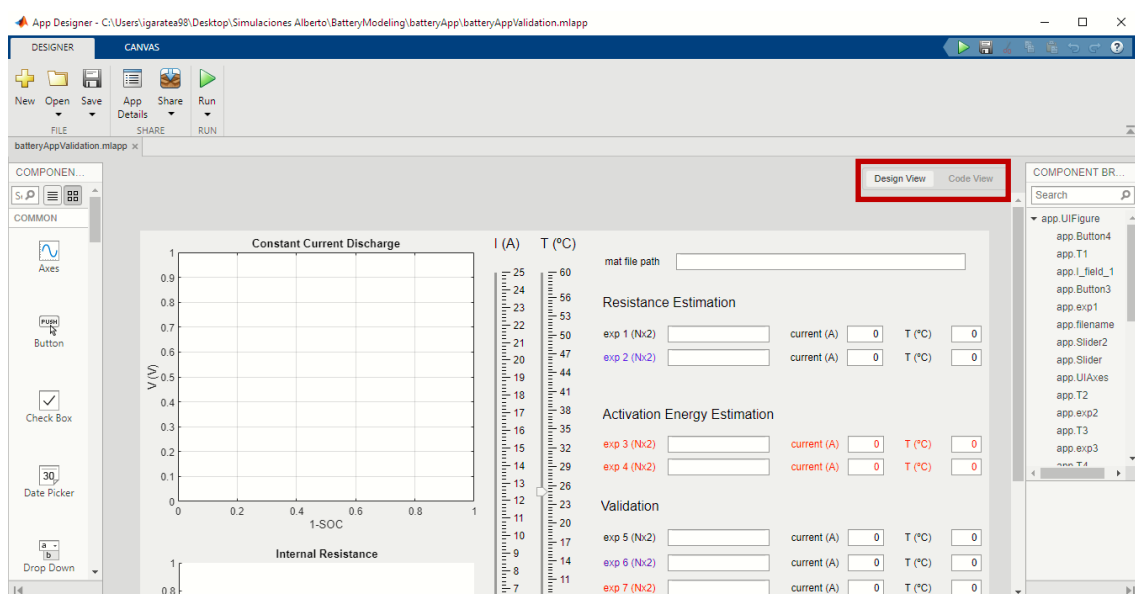


Figura 37 Ubicación del botón Code View en Battery App

Así, por ejemplo, si se quisiera cambiar el nombre del archivo de exportación se podría hacer modificando las siguientes líneas:

```
326 % Button pushed function: Button3
327 function exportParameters(app, event)
328     varOut.Em = app.Em;
329     varOut.R0 = app.R0;
330     varOut.Ea = app.Ea;
331     save('equivCircParam', 'varOut')
332 end
```

Figura 38 Líneas de código donde se indica como se guardan los parámetros calculado en Battery App

O si se quisiera cambiar la manera en la que se estiman los parámetros, también se encuentra en este apartado de código:

```
224 % Button pushed function: Button4
225 function calculateParam(app, event)
226     app.R0 = abs((app.V_exp(:,2)-app.V_exp(:,1))/(app.I(2)-app.I(1)));
227     app.Em = app.V_exp(:,1) + app.I(1) * app.R0;
228     app.Ea = abs(8.314 * log((app.Em-app.V_exp(:,4))./(app.Em-app.V_exp(:,3)))/(1/(273+app.T(4)) - 1/(273+app.T(3))));
229     plot(app.UIAxes2, flipud(app.SOC_exp), app.R0)
230 end
```

Figura 39 Líneas de código que se ejecutan a la hora de calcular los parámetros

Tener **acceso al código** fuente de esta herramienta, permite al usuario tener mucha **flexibilidad** a la hora de estimar su modelo de batería.

Como se puede ver, el hecho de tener acceso al código fuente de esta herramienta, permite al usuario tener mucha flexibilidad a la hora de estimar su modelo de batería, ya que puede realizar tantos cambios como él quiera, pudiendo obtener el modelo tan complejo como él desee sin necesidad de estar atado a las condiciones iniciales, aunque son bastante buenas, de Simulink-Matlab.

Capítulo 6: Passive Balancing

Los sistemas de baterías modernos, especialmente aquellos basados en baterías de ion-litio requieren un control y monitoreo del estado de cada celda para asegurar un funcionamiento seguro y una durabilidad adecuada. Esta función es realizada por el sistema de gestión de la batería (BMS), el cual mide corriente, tensión y temperatura de cada celda y controla la refrigeración, el balanceo y el límite de potencia del sistema [7].

Este capítulo se centra en cómo es posible, **trabajar, estimar y simular** funciones que realiza **el sistema de gestión de la batería**

Este capítulo se centra sobre todo en cómo es posible, a través de Simulink-Matlab, trabajar, estimar y simular algunas de las importantes funciones que realiza el sistema de gestión de la batería, como el balanceo, el análisis de temperatura y estimación del estado de carga (SOC).

En este apartado se analizará sobre todo un modelo simple compuesto por 3 celdas en serie que empiezan en un estado de carga bajo, y fuera de balance.

6.1 Balanceo de la celda

Una de las funciones más importantes del BMS es el balanceo de las celdas de la batería. El desbalanceo de la batería aparece sobre todo por la descarga y carga cíclica de la batería. Esto provoca que algunas celdas se encuentren en un estado de carga diferente a las demás, provocando el desbalanceo. Esta situación es indeseable ya que limita la cantidad de energía que puede suministrar la batería. La celda más débil es la se encargará de poner dicho límite. Por otro lado, la celda que presente un mayor estado de carga será la que limite la cantidad de energía que la batería pueda almacenar cuando esta sea cargada.



Figura 40 Conjunto de celdas desbalanceadas

Típicamente este problema se soluciona con un sistema de disipación denominado balanceo pasivo. En este sistema se colocan unas resistencias en paralelos con cada celda, las cuales se encargarán de quemar toda aquella energía de exceso de las celdas con un mayor SOC. De esta manera conseguiremos homogeneizar todo el SOC de la batería, consiguiendo una mayor durabilidad y eficiencia.



Figura 41 Conjunto de celdas balanceadas

6.2 Modelo de Simulink-Matlab

Este modelo mostrado en la figura 42 muestra una pequeña batería formado por una estructura de 3 celdas en serie (3S-1P).

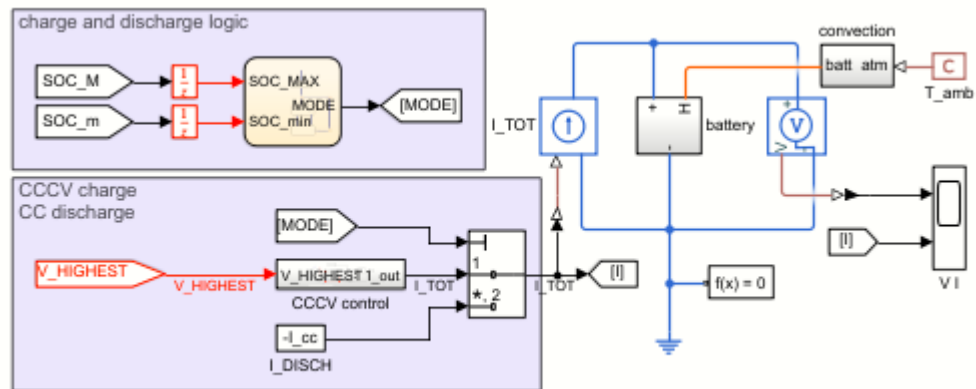


Figura 42 Modelo de Passive Balancing de Simulink-Matlab

La batería situada en el centro recibe corriente de la fuente situada a su izquierda. El sistema de carga que sigue este modelo es el conocido como corriente constante- tensión constante (CCCV).

Si se hace doble click en la batería, podremos ver su estructura interna:

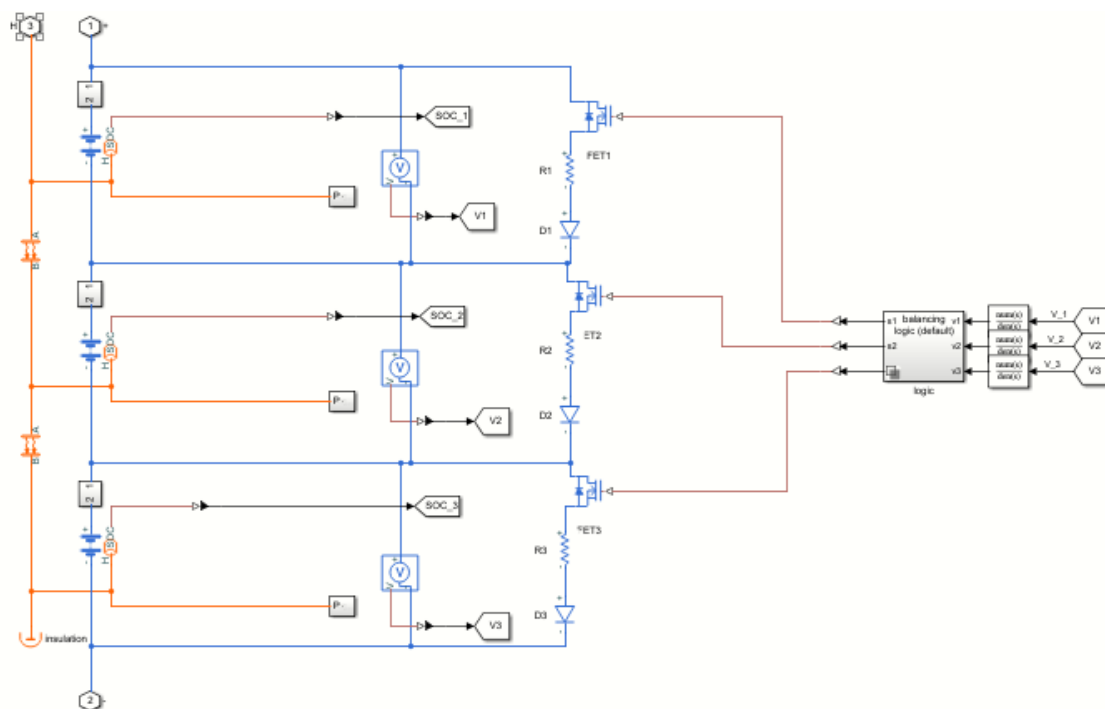


Figura 43 Estructura interna de la batería en Simulink

Donde a la derecha se observa la circuitería de balanceo, que incluye las resistencias donde se quema la energía, y los transistores que se encienden o se apagan dependiendo de la lógica del balanceo. La estructura de esta lógica se explicará más adelante en este capítulo. No obstante, a partir de esta lógica se le mandan las señales a los MOSFET de encendido o apagado. De esta manera, permiten el paso a través de la resistencia, dando lugar a la técnica de balanceo.

Por otro lado, los bloques naranjas a la izquierda de las celdas representan la transferencia de calor convectivo entre las celdas o entre las celdas y el entorno. Estos bloques son los que forman la parte térmica del circuito. Además, hay que señalar que una de las celdas está aislada, mientras que la de más arriba está en contacto con el ambiente.

Por último, se va a analizar la lógica del balanceo. Si se hace doble click en el cuadro de lógica, se verá lo siguiente:

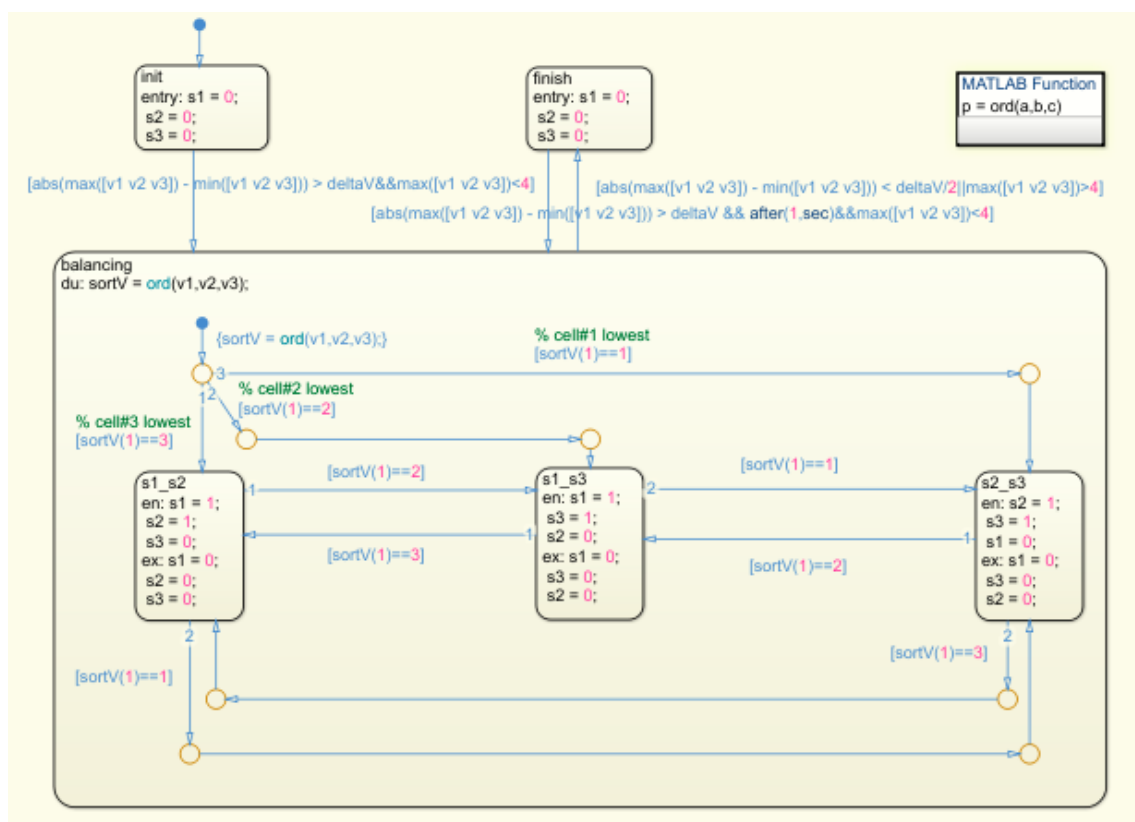


Figura 44 Cuadro lógico del balanceo pasivo

Donde cada bloque representa un estado donde a algunas variables se les asigna un cierto valor. En este caso, estas variables son las señales de control de los transistores: 1 para encendido y 0 para apagado.

Para hacer el balanceo, lo primero que hace Simulink es ordenar en orden ascendente la tensión suministrada por cada celda. Y dependiendo de esta tensión accede a un estado o a otro, decidiendo de esta manera que MOSFET se debe activar. Si se supone por ejemplo que la celda número uno es la que presenta una menor tensión de salida, entonces, este algoritmo ejecutará el tercer estado lógico, activando los MOSFET 2 y 3. Y se mantendrá en este estado hasta que la celda 1 deje de ser la que presente la menor tensión de todas, momento en el cual pasará a otro estado diferente.

6.3 Lógica de carga y descarga y de CCCV

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la lógica que sigue Simulink tanto en el proceso de carga y descarga de la batería como en el CCCV. Para ello, en la pantalla central tenemos los dos bloques de la izquierda.

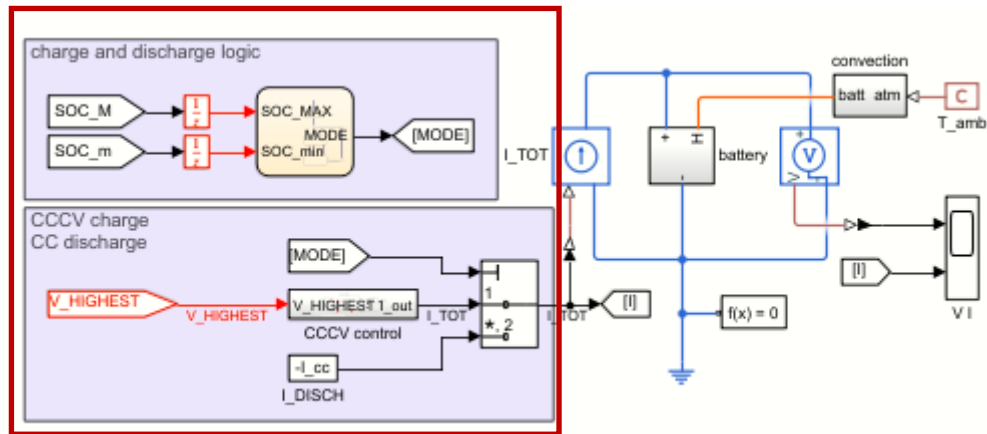


Figura 45 Ubicación de la lógica de carga-descarga y CCCV

Haciendo click dentro del cuadro de lógica de carga y descarga se descubre lo siguiente:

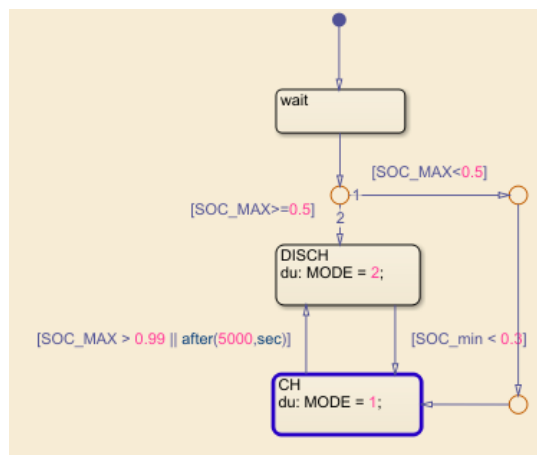


Figura 46 Lógica de carga-descarga

En este cuadro lógico vemos que si el SOC más alto de las celdas supera el 0.5, se pasa directamente al estado 2 (descarga) mientras que si es inferior se pasará al estado 1 (carga). Por otro lado, una vez iniciado el ciclo, únicamente se podrá pasar del estado 2 al estado 1 cuando se supere el 0.99 del SOC o cuando hayan transcurrido 5000 segundos en ese estado. De la misma manera, solamente se pasará del estado 1 al 2 cuando el SOC sea inferior a 0.3.

Esta es la lógica que presente Simulink por defecto, no obstante, si el usuario quiere podría modificar estas condiciones o añadir otras. Otorgando una gran flexibilidad a esta herramienta.

Por otra parte, si se hace click en el cuadro de V_HIGHEST1_out, se verá lo siguiente:

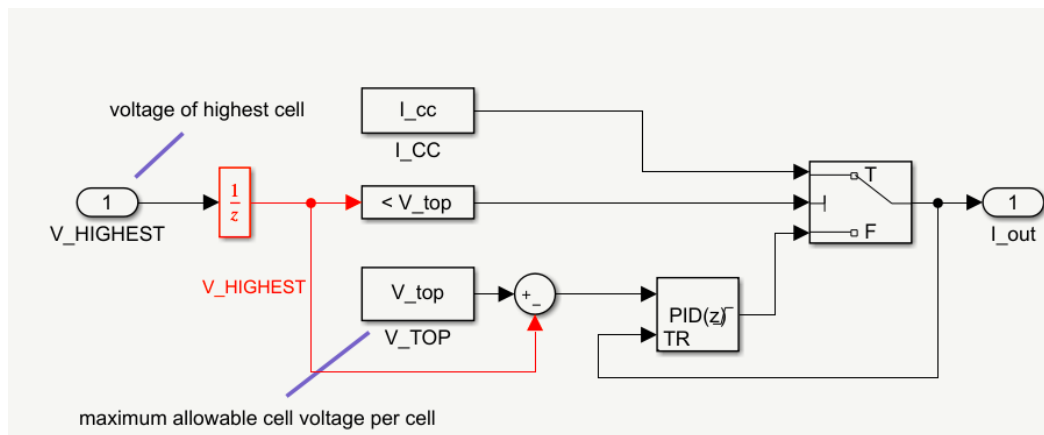


Figura 47 Lógica de V_{top} en Simulink

Este circuito lo que hace es medir la tensión de las celdas, y si por alguna razón cualquiera de las tensiones de las diferentes celdas superase el valor V_{top} impuesto por el usuario, se desconectaría la orden de señal a la fuente de corriente dejando de excitar a la batería. Esto sirve como medida de seguridad ya que pudiera ser que nos interesase que las celdas no sobrepasaran cierto nivel de tensión.

6.4 Simulación del sistema

A la hora de realizar la simulación de este sistema es posible elegir entre dos programas, por un lado, *batt_charging_ini.m* y por otro *passiveBalancing_ini.m*. A la hora de ejecutar el primer programa la batería será sometida a una serie de ciclos de carga y descarga del SOC y se visualizarán las gráficas de su comportamiento mientras que si se ejecuta el segundo programa se realizará la técnica de CCCV.

Antes de analizar las gráficas de las simulaciones, es interesante estudiar un poco los diferentes programas ahora comentados. Ambos programas son muy similares entre sí. Con la diferencia ya comentada de su comportamiento. Sin embargo, también es importante señalar las últimas líneas de ambos programas (las cuales son idénticas).

```

Editor - passiveBalancing_ini.m
batt_charging_ini.m  passiveBalancing_ini.m  +
107 % For natural convection this number should be in the range of 5 to 25
108 h_conv = 5; %W/m^2/K Cell-to-cell
109 h_conv_end = 10; %W/m^2/K End cells to ambient
110
111 %% Passive balancing parameters
112 % load('tempParam')
113 I_cc = 4;
114 R = .2;
115 R_bleed = 2;
116 T_volt = 10;
117 V_th = 11.5;
118 deltaV = 0.01;
119 V_top = 4.1;
120
121 %%

```

Figura 48 Líneas de código de Passive Balancing

En estas últimas líneas, el apartado Passive balancing parameters es el más interesante de todos, ya que nos permite controlar las diferentes variables que entran en juego en nuestro sistema, como son la corriente de carga y descarga (I_{cc}) la resistencia de balanceo (R_{bleed}) o el límite de tensión de las celdas (V_{top} , comentado en el apartado anterior).

Una vez explicada la diferencia entre ambos programas, se analizará la respuesta de cada uno:

6.4.1 Battery charging

Si se ejecuta el programa *batt_charging_ini.m* en Matlab y a continuación se ejecuta la simulación en Simulink se podrá observar cómo aparecen 4 gráficos. En este caso particular se ha ejecutado simulando 3 celdas de 3 Ah cada una y una tensión nominal de 3.6 V e imponiendo una V_{top} de 4.2.

La primera gráfica en aparecer es la que aparece en la figura 49 que muestra tanto la tensión que entrega la batería como la corriente.

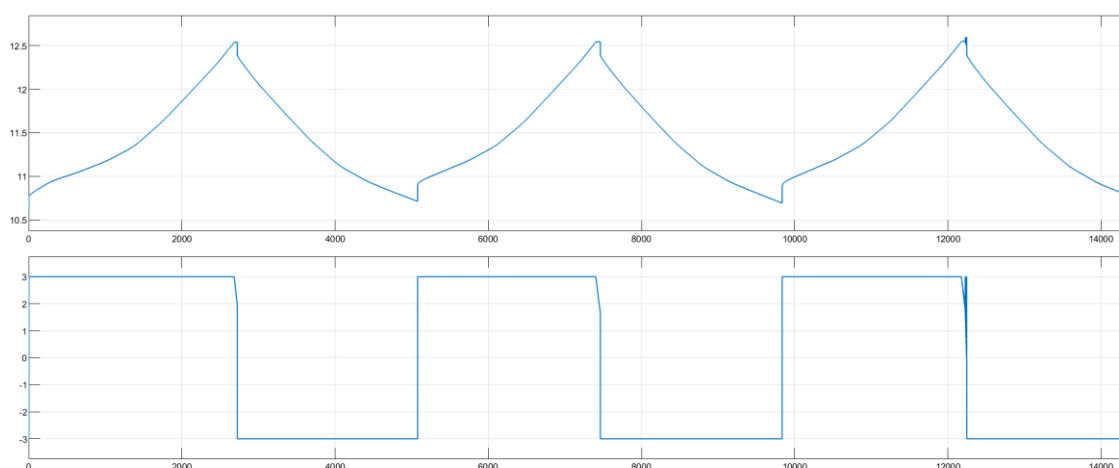


Figura 49 Gráficas de la simulación de Battery Charging

Como se puede observar se trata de ciclos de carga y descarga de la batería. Esta sería la respuesta ante la estimulación descrita. Por un lado, la corriente es constante tanto para la carga como para la descarga en ± 3 A. Sin embargo, vemos como la tensión va variando entre los 10.7 y los 12.5 V aproximadamente. Lo hace de manera lineal y cíclica.

Por otro lado, en la figura 50 se ve cómo va variando el SOC

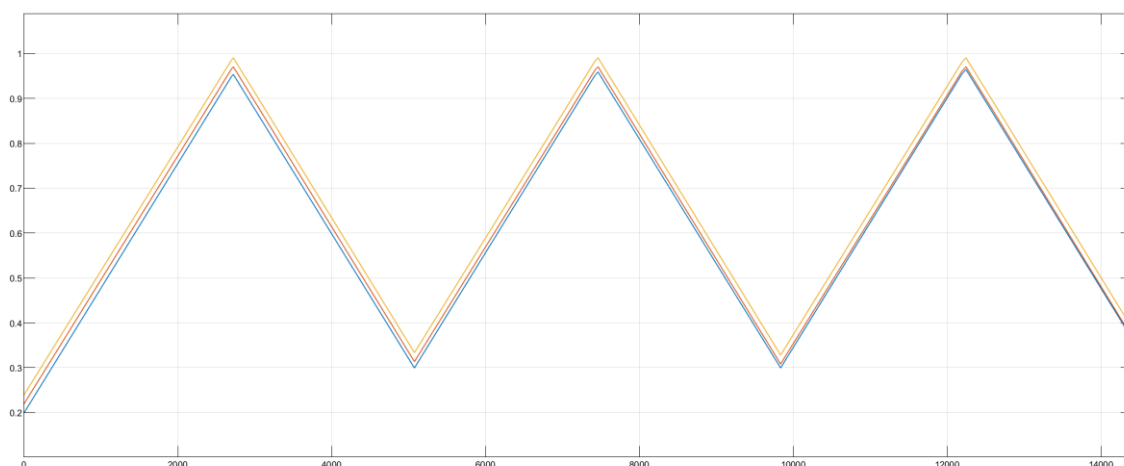


Figura 50 Variación del SOC en Battery Charging

En esta gráfica es donde mejor se aprecia el comportamiento descrito en el bloque lógico de carga y descarga. Como se observa en la imagen las tres celdas comienzan con un SOC diferente, por lo que se encuentran desbalanceadas. Al ser el SOC máximo menor que 0.5 comienza el proceso de carga. Y cuando alguno de los tres SOC de las diferentes llega a 0.99 comienza el proceso de descarga, el cual no cesa, hasta que se alcance un SOC inferior a 0.3.

Por otro lado, mientras se realizan los procesos de carga y descarga, entra en juego el BMS de la batería el cual enciende y apaga los diferentes MOSFET para intentar balancear los SOC. En esta figura vemos como las baterías que se encuentran más descargadas (colores azul y verde) cada vez se van juntando más hasta que al final de la simulación se encuentran superpuestas. Además, la gráfica de color rojo también tiende a acercarse cada vez más a ese SOC. Por lo que se puede decir, aunque sí que es cierto que el proceso puede ser un poco lento, se consigue balancear las celdas de la batería de manera exitosa. No obstante, si quisiéramos conseguir un balanceo más rápido, una de las opciones podría ser imponer una R_{bleed} (resistencia conectada en paralelo con cada celda) más pequeña. Aunque eso dependerá sobre todo de la aplicación que se esté utilizando.

A continuación, se visualiza la gráfica de temperaturas.

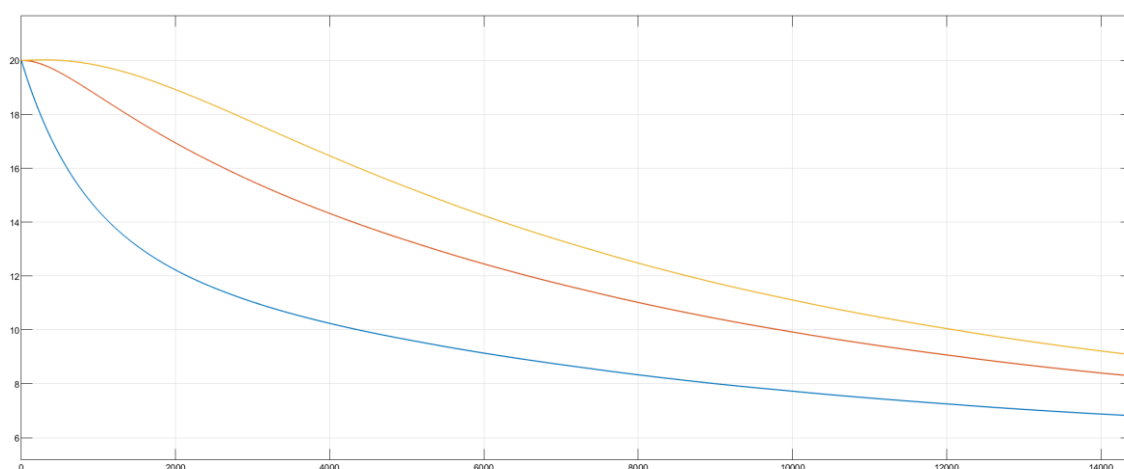


Figura 51 Variación de la temperatura en Battery charging

Para conseguir esta gráfica Simulink-Matlab ejecuta el modelo térmico anteriormente descrito para cada celda. Obteniendo el siguiente resultado. Como se puede ver, en este caso, la temperatura de las celdas siempre se encuentra bajo control, sin superar en ningún momento los 20 °C.

Este análisis térmico puede resultar de gran utilidad en aplicaciones donde la temperatura sea un factor relevante. Ya que obligar a la batería a trabajar en ambientes con temperaturas demasiado altas puede degradar la batería, o en algunos casos hacer que esta explote.

Por último, Simulink-Matlab nos ofrece la posibilidad con esta última gráfica de poder realizar un análisis detallado del comportamiento de cada celda.

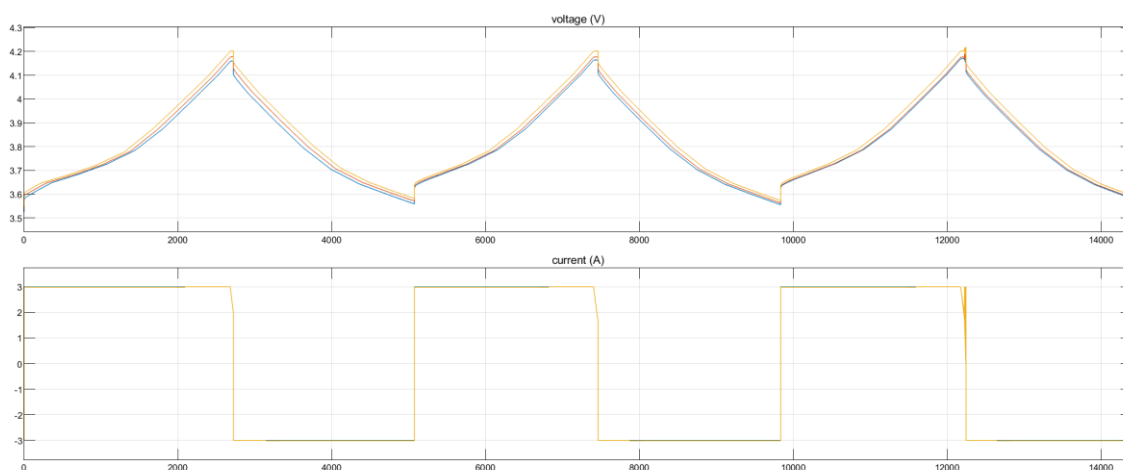


Figura 52 Tensión y corriente de cada celda en Battery Charging

En esta figura se nos muestra la tensión que entrega cada celda de la batería al igual que la corriente. Como se puede observar tiene un comportamiento parecido a la primera gráfica mostrada en la figura 49, algo lógico, ya que la tensión de la batería se consigue sumando la tensión individual entregada por cada celda. Además, como se ve en la gráfica, ninguna de las celdas supera los 4.2 V, límite impuesto como V_{top} en el código fuente.

6.4.2 Passive balancing

Por otro lado, si se ejecuta en Matlab el programa *passiveBalancing_ini.m* y a continuación se realiza la simulación en Simulink, aparecerán estas otras 4 gráficas, que, aunque son parecidas presentan varias diferencias.

En primer lugar, se observa la gráfica que muestra tanto la tensión como la corriente de la batería.

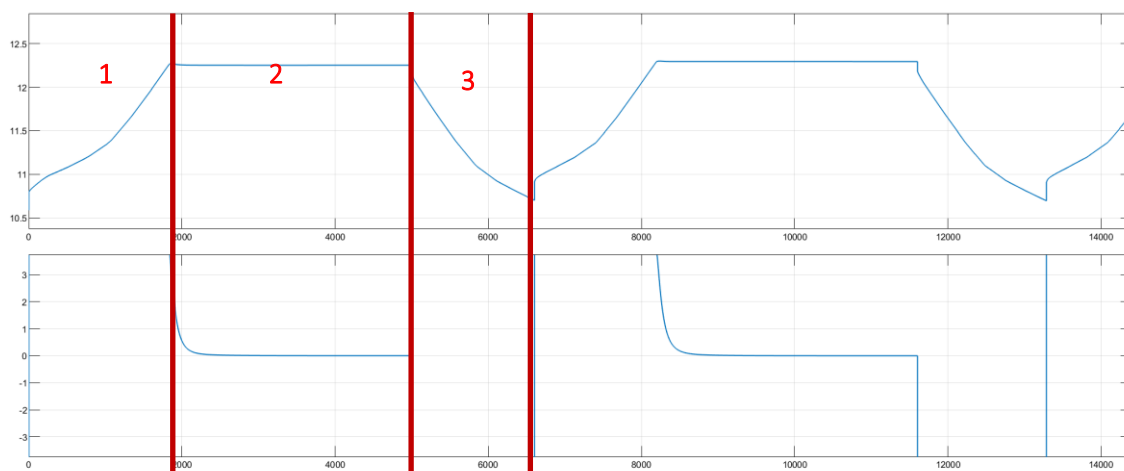


Figura 53 Tensión y corriente de la batería en Passive Balancing

Tal y como se percibe en la gráfica de la figura 53 cuando se ejecuta el programa de *passiveBalancing_ini* cada ciclo de carga-descarga se puede dividir en 3 fases bien diferenciadas. Por un lado, la carga se divide en dos fases: una a corriente constante y la otra tensión a tensión constante. Por otro lado, la carga se realiza a corriente constante.

Es en esta gráfica donde mejor se visualiza la técnica de CCCV. Sobre todo, en las fases 1 y 2 mostradas en la figura 53. Esta es una técnica muy utilizada a la hora de realizar el balanceo de las celdas de batería.

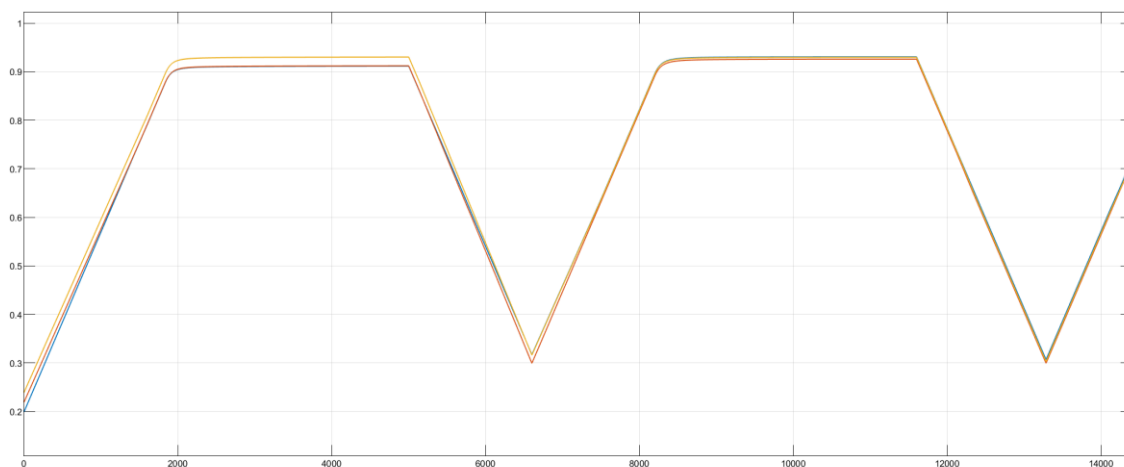


Figura 54 Estimación del SoC en Passive Balancing

En esta otra gráfica observamos el SOC de cada celda. Como vemos, aunque parecido, presenta diferencias con la gráfica del SOC del apartado anterior. Esta vez se puede reparar que el SOC de las celdas aumenta de manera lineal hasta alcanzar un límite superior estable en 0.9 aproximadamente, para luego, mientras se realiza la descarga bajar hasta el 0.3. La razón por la que el SOC se estabiliza en ese valor se explicará un poco más adelante, cuando se analice la gráfica de tensión-corriente para cada celda, aunque el motivo está muy relacionado con V_{top} . Además, es en esta gráfica donde mejor se vislumbra que poco a poco los SOC tienden a converger hacia el mismo valor, lo que se puede considerar que el balanceo se está realizando correctamente.

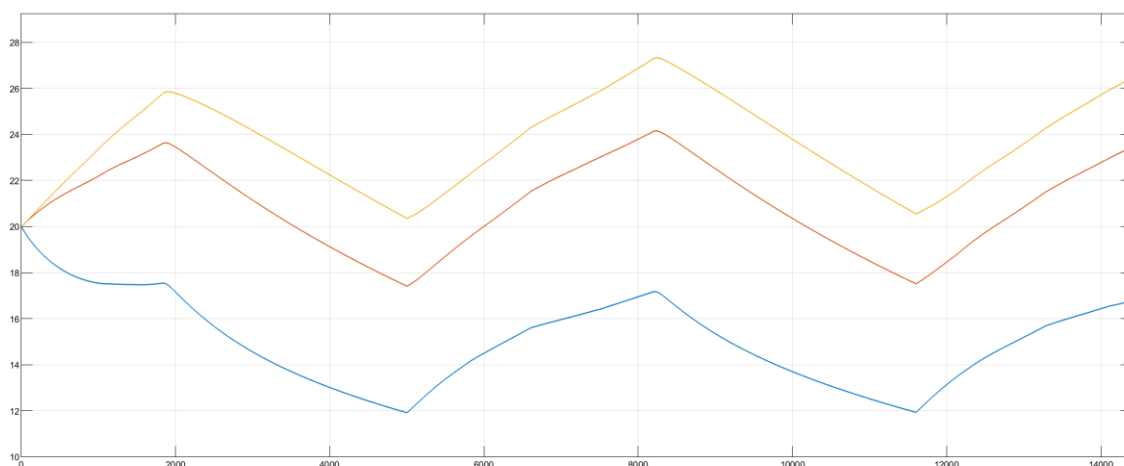


Figura 55 Variación de la temperatura en Passive Balancing

Además, en este caso, Simulink-Matlab también entrega una gráfica que representa el comportamiento térmico de las celdas, en caso de querer hacer un análisis térmico, o si se está limitado por cualquier factor de tipo térmico, esta información puede resultar de gran utilidad.

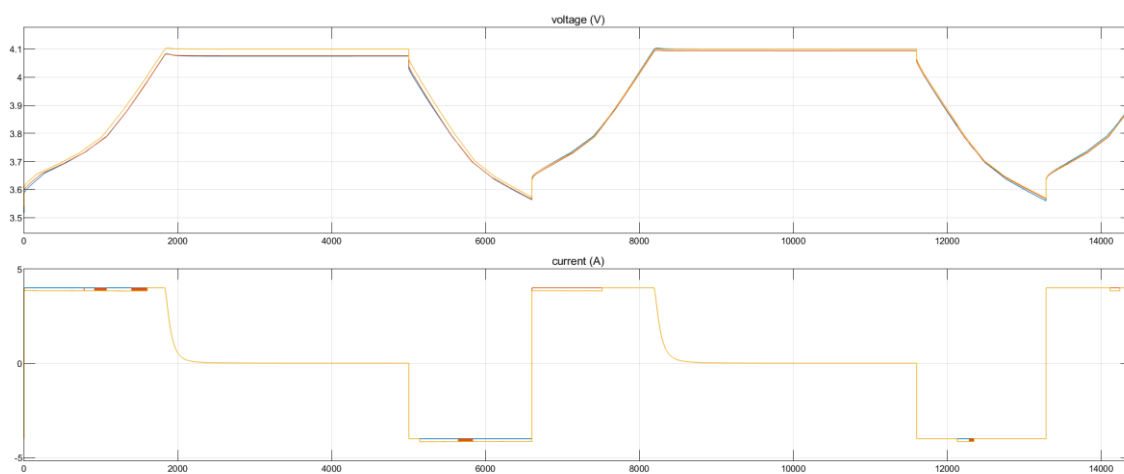


Figura 56 Tensión y corriente de cada celda en Passive Balancing

Por último, nos encontramos ante esta última gráfica, donde se nos muestra la tensión y la corriente y la tensión suministrada por cada celda. En esta gráfica al igual que en la de la figura 53 se puede apreciar claramente el proceso de CCCV. Pero, además, si hacemos zoom en las tensiones es donde mejor podremos observar la lógica de estados explicada en la figura 44.

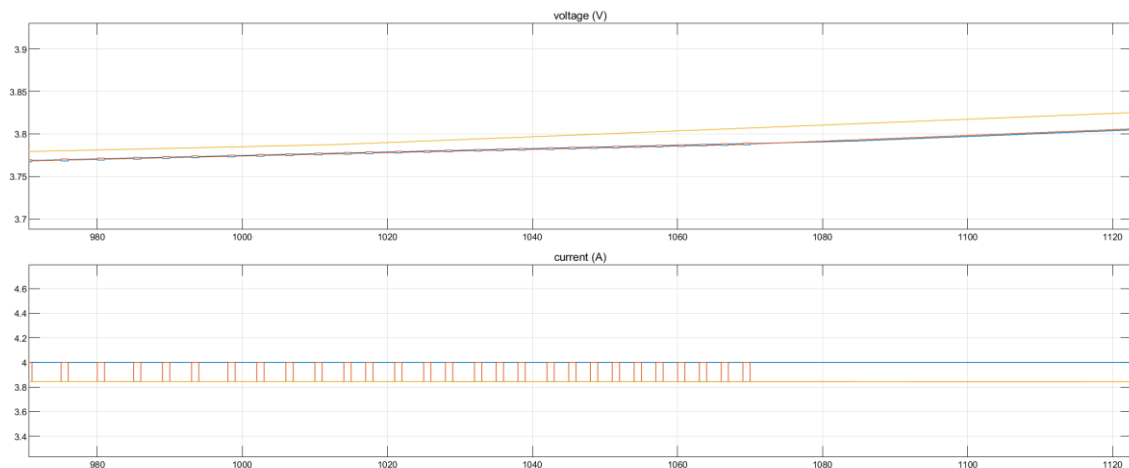


Figura 57 Zoom de la tensiones y corrientes de cada celda en Passive Balancing

La gráfica de arriba muestra la tensión, mientras que la de abajo la corriente de cada celda. Como se ve, en las tensiones la de color rojo se sitúa en todo momento por encima de la de color azul y verde. No obstante línea de color azul y verde a lo largo del tiempo se van cruzando. Como se explicó en la lógica de estados de los MOSFET, es la tensión más baja la que marca que transistor se conecta y cual se desconecta. Por eso, se puede ver como cada vez que se cruzan una de estas líneas se produce un cambio en la corriente, lo que indica que los MOSFET están cambiando de estado. Poniendo de esta manera en práctica el sistema de balanceo.

Capítulo 7: Conclusiones y líneas futuras

7.1 Conclusión

En este proyecto se ha explorado el alcance de la herramienta Battery Modeling desarrollada por MathWorks para Simulink-Matlab, abarcando áreas como la estimación de parámetros, estimación del SOC o el balanceo pasivo. Ciertamente es que se partía de una base de desconocimiento del funcionamiento de esta herramienta lo que parecía que pudiera dificultar el trabajo. No obstante, a lo largo de todo el tiempo que ha durado el proyecto se ha aprendido mucho del funcionamiento de Simulink, de Matlab, de baterías y de la herramienta Battery Modeling.

Con respecto a los objetivos planteados al comienzo de este trabajo, se puede concluir lo siguiente:

En primer lugar, a lo largo de este trabajo se ha demostrado que Simulink-Matlab, a través de Battery Modeling, es una herramienta que ofrece multitud de opciones y facilidades en el campo de las baterías, tanto para el desarrollo de aplicaciones, control de sistemas o diseño de equipos de gestión. Es además un software de fácil manejo y muy completo que tiene en cuenta las variables más importantes que afectan a las celdas, por lo que ofrece un potencial altísimo que merece la pena explorar y tener muy en cuenta a la hora de trabajar con baterías.

Por otro lado, en el capítulo de estimación de parámetros mediante ensayos experimentales, la calidad de los resultados obtenidos es bastante óptima. En este caso se puede afirmar que la simulación se acerca bastante al comportamiento de la batería medido de manera experimental. Ciertamente es que en los niveles de menor SOC se aprecian más diferencias. No obstante, catalogaría el resultado de correcto. Probando que esta es una herramienta bastante útil que permite, a través de una manera sencilla, construir un modelo bastante acertado de una batería.

En el mismo orden está Battery App. Herramienta a través la cual es posible estimar el funcionamiento de las celdas ante unas condiciones de contorno arbitrariamente elegidas por el usuario. Además, a lo largo de este trabajo se ha visto que permite una gran flexibilidad en el diseño de aplicaciones. Esta herramienta puede facilitar no sólo la estimación de un modelo sencillo a partir del cual se modela la batería, sino que ofrece la ventaja de que no es necesario realizar ningún experimento para ello: los datos ofrecidos por el fabricante en la Data Sheet son suficientes. Es por ello que puede ser una herramienta que facilite mucho el trabajo de diseño y de una manera muy rápida, sencilla y eficaz construir un modelo de la celda, que, aunque sencillo, es muy útil a la hora de trabajar con celdas. Herramienta muy recomendada para proyectos donde no es posible acceder al laboratorio. Además, el hecho de poder acceder al código ofrece una variabilidad y flexibilidad enormes ampliando en gran manera las posibilidades que proporciona al usuario.

Asimismo, está toda el área del balanceo pasivo. Un área que ofrece una gran variedad de posibilidades sobre todo en el trabajo más técnico del desarrollo de baterías. Ofrece análisis tanto de tensión, corriente como de temperatura. Es el área estudiada en este TFG que mejor se puede explotar, la que más información ofrece y por tanto una de la más completas del paquete Battery Modeling. En este trabajo se realizó un ejemplo con un paquete de batería sencillo 3S-1P, no obstante, el paquete se puede hacer tan complejo como se quiera, por lo que el potencial

de esta herramienta es amplísimo. Dada la gran información que se puede recoger de él: tensión, temperatura, corriente, SoC etc. hace de este software un complemento muy interesante tanto para el diseño como para el análisis de un sistema de baterías, tanto a nivel profesional como investigador. Se trata de una herramienta excelente para el dominio y control de equipos de almacenaje de energía.

En definitiva, se puede decir Battery Modeling ofrece una gran variedad de posibilidades, siendo su alcance muy amplio, potente, eficiente y flexible. Es una herramienta muy útil a la hora de realizar diseños o análisis de los sistemas de control de baterías. A su vez este programa dada su fácil interacción con el usuario es una herramienta excelente que se debería tener muy en cuenta en el ámbito laboral del sector de baterías. Pero además también puede ser muy beneficioso y se podría utilizar en ámbitos como la investigación o la docencia, permitiendo comprender cómo es el funcionamiento interno de una batería y cuáles son las variables que más se deberían tener en cuenta a la hora de trabajar con ellas.

Battery Modeling es una herramienta **muy útil** a la hora de realizar diseños o análisis de los sistemas de control de baterías.

7.2 Líneas futuras

Aunque a lo largo de todos estos meses se ha intentado abarcar el mayor número de áreas que ofrece Battery Modeling, como han sido el Battery Parameter Estimation, Battery App y Passive Balancing, no se ha podido alcanzar un conocimiento completo de todas sus posibilidades. Dejando como líneas futuras no solamente la profundización si se quiere de las tres áreas aquí descritas, sino también de otros puntos que no ha sido posible estudiar a lo largo de este trabajo.

Por tanto, es interesante recordar cuales son todas las posibilidades que ofrece la herramienta Battery App:

- 1- Cell Characterization
- 2- Battery App
- 3- 3S-1P battery pack CCCV charge with passive balancing
- 4- EV battery cooling
- 5- UKF observer to estimate SoC
- 6- R0 online estimation using EKF

En este TFG se han tocado los 3 primeros puntos, quedando como líneas futuras el estudio y análisis de los 3 siguientes: EV battery cooling, UKF observer to estimate SoC y R0 online estimation using EKF. Se podrían realizar como extensión de este TFG. De esta manera se terminaría de abarcar todas las posibilidades que ofrece Battery Modeling, quedando entonces un análisis bastante completo de lo que ofrece la herramienta.

Por otro lado, otras posibles líneas futuras podría ser el diseño de un BMS, un algoritmo de estimación del SOC o el desarrollo de alguna aplicación de gestión de baterías utilizando esta herramienta. Es decir, se podría hacer uso de esta herramienta para aplicaciones concretas dentro del sector de almacenaje de energía mediante el uso de baterías.

Capítulo 8: Referencias

- [1] Enerdata, “Global Energy Statistical Yearbook,” 2019. [En línea]. Available: <https://yearbook.enerdata.net/>. [Último acceso: Agosto 2020].
- [2] M. Jacoby, “It’s time to recycle lithium-ion batteries,” *C&EN Glob. Enterp.*, vol. 97, no. 28, pp. 29–32, 2019.
- [3] Isidor Buchman, “Batteries for a portable world” Cadex, 2011.
- [4] MathWorks, [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/videos/modeling-batteries-using-simulink-and-simscape-1562930245321.html>. [Último acceso: Agosto 2020].
- [5] MathWorks, [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/videos/battery-cell-balancing-and-state-of-charge-soc-estimation-1562926875853.html>. [Último acceso: Agosto 2020].
- [6] Alberto Berrueta. Apuntes de la asignatura Almacenamiento de Energía Eléctric, Máster Universitario en Energías Renovables. Universidad Pública de Navarra.
- [7] Marta Pérez Estébanez, “Preparación y estudio de conductores de litio con estructura tipo nasicon” 2013. [En línea]. Available: <https://eprints.ucm.es/21656/1/T34515.pdf> [Último acceso: Agosto 2020].